

文章编号: 0258-7025(2003)10-0885-05

高重复频率大能量单纵模激光器

刘 朗¹, 秘国江¹, 黄茂全², 张世文¹, 杜 涛¹, 王运谦¹

(¹ 华北光电技术研究所激光技术部, 北京 100015; ² 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要 采用半导体激光抽运单纵模激光器作为主振荡器、三级氙灯抽运的 Nd:YAG 放大器及受激布里渊散射(SBS)位相共轭镜组成双通放大 MOPA 系统, 并采用像传递、热退偏补偿及消除激光器自激等关键技术, 完成了一套高重复频率大能量单纵模激光器。在频率为 40 Hz 时, 获得输出能量 >450 mJ, 能量输出稳定性为 3.5% (RMS), 脉冲宽度约 8 ns, 光束质量为近衍射极限(<1.3 衍射极限)的实验结果。

关键词 激光技术; 单纵模; 热退偏补偿; 像传递; 受激布里渊散射(SBS)位相共轭

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

High Repeating Rate and Big Energy Single-longitudinal-mode Laser

LIU Lang¹, BI Guo-jiang¹, HUANG Mao-quan²,
ZHANG Shi-wen¹, DU Tao¹, WANG Yun-qian¹

(¹ North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China
² Institute of Electro-optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract In the paper, a solid-state master oscillator amplifier (MOPA) system is built, which consists of a single-longitudinal-mode resource pumped by semiconductor, three amplifiers pumped by xenon lamps which beam light passes double times and the phase conjugating SBS-mirror to compensate the phase distortions. In this laser system, image transfer, thermal depolarization compensation, elimination of self-lasing and other key technologies are employed to improve the quality of the output beam.

In addition, the output energies over 450 mJ are attained at 40 Hz, with output energy stability of 3.5% (RMS), the pulse width about 8 ns, and mode quality <1.3DL.

Key words laser technique; single-longitudinal-mode; thermal depolarization compensation; image transfer; SBS phase conjugation

1 引 言

高重复频率大能量单纵模激光器具有窄线宽、光滑的空间和时间波形, 高重复频率和高峰值功率, 是各种科学研究工作非常有用的光源。

实现高重复频率大能量单纵模 Q 输出主要有两种方法: 1) 单纵模种子源注入伺服非稳谐振腔, 利用扫频技术, 产生单纵模激光, 再经数级放大形成大能量激光输出。此方法伺服反馈系统复杂, 容易失谐。高重复频率状态工作时, 热效应引起应力双折射, 影响光束的质量。2) 结合像传递和位相共轭

技术的 MOPA 系统直接以高稳定的激光二极管(LD)抽运单纵模激光器作为主振荡器, 舍弃伺服谐振腔, 完全消除了传统的种子注入方案种子频率和伺服谐振腔频率失谐、单纵模几率下降问题, 为放大级提供高光束质量的抽运源。利用像传递、位相共轭及双通放大技术, 保证振荡级光束经放大后仍具有相同的光束质量。光束会聚、波前畸变和热致双折射造成的退偏问题很小, 因此激光器可在很宽的动态范围内运转, 并保持高光束质量的单纵模激光输出。此类 MOPA 系统是近年来激光技术领域中的

收稿日期: 2002-12-09; 收到修改稿日期: 2003-04-07

作者简介: 刘朗(1955—), 男, 北京华北光电技术研究所研究员, 硕士, 主要从事固体激光技术研究。E-mail: bi_gj@eyou.com

十分重要的前沿研究分支,国内外均有这方面的理论和实验工作^[1~4],但国内没有形成产品。本文采用 MOPA 技术途径完成。

2 工作原理

高重复频率大能量单纵模固体激光器光路示意图如图 1 所示。激光二极管抽运单纵模固体激光器 DPSL 输出的激光束经法拉第光隔离器、扩束、整形成近平顶轮廓的波形。利用像传递技术,经 $4f$ 系统逐级传递,保持光束直径和发散角不变。不论重复频率、抽运能量等热负载条件如何变化,光束通过三级放大器后具有相同的热负载环境。线偏振光经第一级后,热致双折射产生的径向和切向偏振分量由

两级间的石英偏振旋转器 Rt_3 交换 90° 进入第二级,与其产生的退偏影响相抵消。从第三级出来的光束经 45° 法拉第光隔离器进入受激布里渊散射(SBS)池。因位相共轭和像传递的作用,反射光束精确地按入射光束相同的路径,再次通过法拉第光隔离器,径向和切向偏振分量交换 90° 经过第三级放大,使自身产生的热退偏抵消。反向通过前两个放大级恢复到放大前的波面,成为与入射光正交的线偏振光经 P_5, P_6 输出。

像传递与位相共轭技术的结合,补偿了热影响及工作物质不均匀放大带来的各种光束质量缺陷、位相畸变、应力双折射造成的退偏、双焦点等影响。输出光束在激光器外的像位置处,将是近衍射极限、时间空间波形光滑的近平顶轮廓光束。

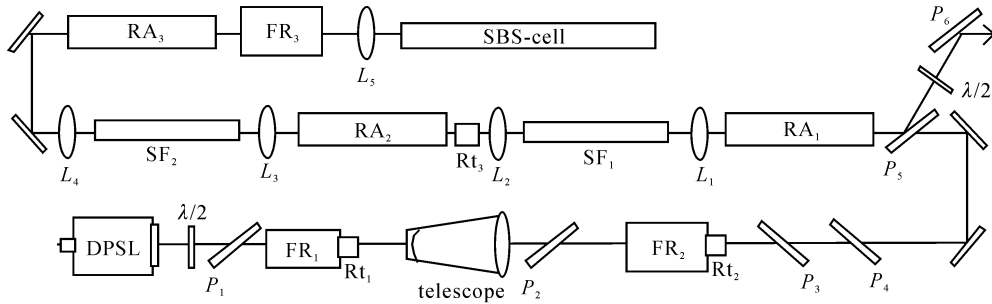


图 1 高重复频率大能量单纵模激光器光路图

DPSL:激光二极管抽运单纵模种子源;FR₁~FR₃: 45° 法拉第光隔离器; $L_1 \sim L_5$:凸透镜;
SBS-cell:位相共轭池;RA₁~RA₃:放大器;Rt₁~Rt₃:石英旋光器;SF₁, SF₂:空间滤波器; $\lambda/2$:二分之一波片; $P_1 \sim P_6$:偏振片

Fig. 1 Configuration of high frequency and big energy single-longitudinal-mode laser system

FR₁~FR₃: 45° Faraday isolators; $L_1 \sim L_5$: thin lenses; RA₁~RA₃: amplifiers;

Rt₁~Rt₃: quartz rotator; SF₁, SF₂: spatial filters; $\lambda/2$: half wave plate; $P_1 \sim P_6$: polarizer

3 关键技术

3.1 高稳定激光二极管抽运单纵模固体激光技术

高稳定度单纵模激光二极管抽运激光器是系统的种子源,其稳定运行直接决定了 SBS 的反射率、工作稳定性和输出光束的时间特性。种子源采用 LD 光纤耦合端面抽运 Nd:YAG 晶体激光器, LiNbO₃ 晶体正负脉冲电光调 Q, 消除其光弹效应。选择合适的激光增益,使 Nd:YAG 激光工作物质充分发挥均匀增益介质的自选模特性,输出脉冲为单纵模。

在重复频率为 40 Hz 时,输出能量约为 45 μ J, 能量稳定性 $< 3.5\%$,图 2 所示的单个脉冲宽度为 18 ns。种子源长时间工作稳定可靠。

3.2 像传递技术

只有把单纵模种子源输出光斑的像,包括因放

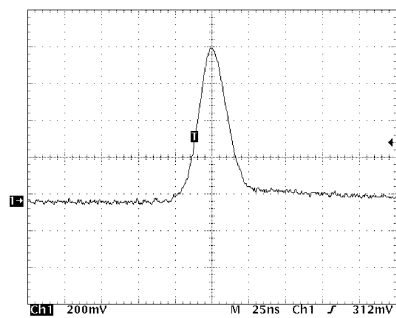


图 2 单纵模种子源脉冲波形

Fig. 2 Laser pulse temporal shape of single-longitudinal-mode

大级热效应产生的热畸变等全部信息传到位相共轭镜,位相共轭镜的反射波再次通过放大级时才能全部补偿热畸变。若部分信息因衍射等原因丢失,

SBS 位相共轭镜是无法补偿的。

像传递是通过一个空间滤波器和两个共焦透镜组成的,如图 3 所示。放大级之间两个透镜组成的系统,可把前一放大级的后主平面 RP_1 成像在后一放大级前主平面 RP_2 上,这就是空间实现完全像传递的条件^[5]。在此装置中,采用了所谓的 $4f$ 系统,即两个共焦透镜焦距相等,且等于主平面到透镜的距离,即 $f_1 = f_2 = l_1 = l_2$ 。

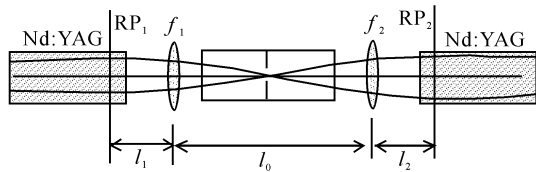


图 3 像传递光路

Fig. 3 Image transfer laser configuration employing two thin lenses and a spatial filter

在两透镜之间放置空间滤波器,两端有双面 $1.064 \mu\text{m}$ 增透的窗片。管内真空度大于 $1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$,防止透镜焦点处空气击穿,焦点处的小孔起空间滤波作用。另外, $4f$ 系统还可使输出光束与激光棒的直径达到最佳匹配,以获取最大的能量抽取率而基本不受热透镜的影响。

3.3 三级放大退偏补偿技术

高功率激光系统中,由热致双折射退偏带来的能量损耗,在单程放大器中可大于 20%。使用放大级退偏补偿技术后,其能量损耗减少到 3% 以下^[6]。热退偏补偿系统的设计有多种方法^[7],本激光器的退偏系统设计充分利用了两个像传递凸透镜,加一个 90° 石英旋光器。这意味着当满足像传递的条件时,也正好满足热退偏补偿的要求。为获得更好的退偏补偿,要求两个放大器晶体的掺杂浓度和梯度、吸收系数和光学均匀性等各项参数相一致,最好是同一单晶、同一位置加工而成。

本激光系统前两级放大的热退偏,是通过 90° 旋光器和两个透镜使放大级 1 各空间点与相对于放大级 2 后各空间点一一对应,使得热致双折射产生的退偏相互抵消。剩下单一第三级的退偏是光束正反两次通过其与 SBS 池间的 45° 法拉第隔离器,偏振态旋转 90° ,使其径向和切向偏振分量交换,热退偏相互抵消。同理,再次通过前两级放大时产生的热退偏也是通过两放大级间的 90° 旋光器来消除的。这样激光器高重复频率工作时整个光路中的热退偏基本上均可消除^[8]。

3.4 SBS 位相共轭镜技术

位相共轭镜技术是改善高功率固体激光器的关键。对于高功率固体激光器,由热激发的位相畸变使激光横模变坏,而应用 SBS 位相共轭镜之后,其共轭反射波具有与入射波共轭的位相面。反射波反向经过三级放大后恢复了原来的波面,输出接近衍射极限的高质量光束^[9]。

SBS 位相共轭镜的反射率、保真度与选用的 SBS 介质的纯度、聚焦强度和入射光的信噪比等因素有关。选择高纯介质,可防止聚焦点上微颗粒被击穿燃烧造成能量损失及非线性介质分子分解而使 SBS 反射率下降。经理论分析及实验验证,采用了简单的单池结构。SBS 池前的凸透镜 $f = 100 \text{ mm}$,间距 10 mm 。经提纯后优级纯化学试剂装入两端有 $1.064 \mu\text{m}$ 增透窗片的 $\phi 25 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 密封玻璃管中,长时间工作稳定,且反射率大于 70%。SBS 也是脉宽压缩的有效方法。在理论上,当聚焦透镜的焦距等于被压缩脉宽对应的二分之一光程时,可获得最大的脉冲压缩,并与抽运的激光功率密度等因素有关。

此外,系统中放大棒、透镜等光学器件较多。因剩余反射率的存在,强氙灯光抽运时,激光工作物质自发辐射易产生自激,故把三个放大棒的端面磨斜,避免造成光学破坏。在高重复频率运转时,少量退偏光可沿原光路返回种子源,进入种子源前光束较细($\sim 1 \text{ mm}$),约十几毫焦耳的退偏光就会造成破坏。因此在种子源和第一级放大之间采用了两级法拉第隔离技术,确保种子源的安全。

4 工作技术指标

4.1 输出脉冲能量

本系统频率为 40 Hz 时种子源工作输出为 $45 \mu\text{J}$,经过扩束整形,法拉第光隔离器和偏振片等光学器件的损耗,到第一级放大前为 $30 \mu\text{J}$,三级放大后为 25 mJ 。经 SBS 返回,再通过三级放大输出,用 EPM1000 能量计连续测量 4800 个脉冲(2 min)的平均输出能量大于 450 mJ ,双通放大总倍数大于 1 万倍,稳定性为 3.6%。第二通放大倍数减小是因为:第一通三级放大系小信号放大,放大倍数大;返回第二通放大为大信号,甚至达到饱和放大,放大系数小。系统的能量输出稳定性较高是因为:1) 控制 SBS 池的注入能量,既要高于阈值而又不能太大,以免造成击穿,破坏 SBS 介质,来尽量减小 SBS 位相

共轭镜的不稳定性。2) 在系统不自激的情况下,适当控制种子源输出能量和各放大级的抽运能量,使其工作在饱和放大状态,进一步提高输出能量的稳定性。

4.2 输出脉冲波形

频率为 1,10,20,40 Hz 时的输出脉冲波形如图 4 所示,脉宽约为 8~10 ns,种子源输出脉冲波形被

SBS 压缩了约一倍,达到预定指标(~ 10 ns)。从图中可看出,不同频率时脉宽变化不大。

4.3 输出光束质量

用一个焦距 $f = 1$ m 的双凸透镜变换输出激光束,并在 1 m 处用相干公司 M^2 因子测试仪测量,输出光束质量 < 1.3 倍衍射极限,并用像纸看远场、近场光斑。

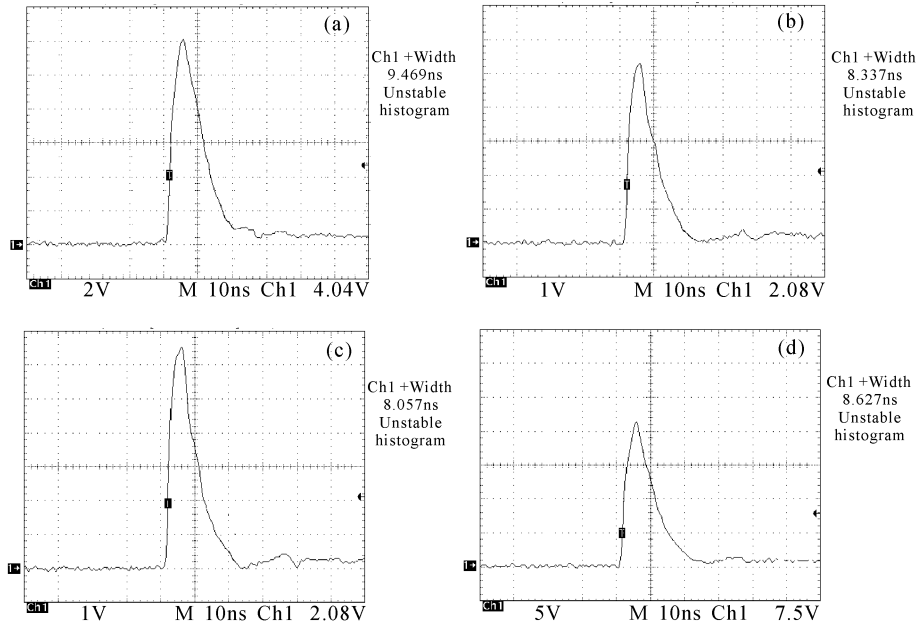


图 4 激光器不同频率时的输出波形

Fig. 4 Laser pulse temporal shape of different frequency

(a) 1 Hz; (b) 10 Hz; (c) 20 Hz; (d) 40 Hz

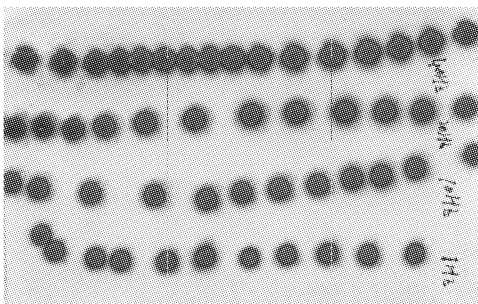


图 5 近场光斑

Fig. 5 Beam disk of the near field

近场光斑如图 5 所示,最上一行频率为 40 Hz,向下依次为 20 Hz,10 Hz 与 1 Hz,光斑大小依次为 $\phi 5.2$ mm, $\phi 4.7$ mm, $\phi 4.7$ mm 和 $\phi 4.3$ mm。

15.88 m 处的远场光斑如图 6 所示,可见在 1 Hz,10 Hz 与 20 Hz 时光斑分布均匀,主光斑外有一圈淡淡的夫琅禾费衍射环,光斑大小均为 $\phi 5.2$

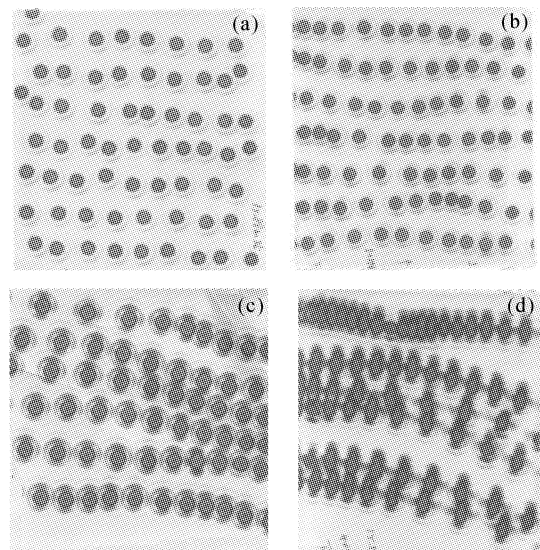


图 6 15.88 m 处的远场光斑

Fig. 6 Beam disk of the far field

(a) 1 Hz; (b) 10 Hz; (c) 20 Hz; (d) 40 Hz

mm。40Hz 时远场光斑有些变椭,是由于热畸变比较严重,SBS 位相共轭没能完全补偿,光斑稍有变形,大小为 $\phi 6.0 \text{ mm} \times 4.7 \text{ mm}$ 。

5 结 论

1) 半导体激光抽运单纵模 Nd:YAG 激光器作为主振荡器,三级氙灯抽运的 Nd:YAG 放大器及 SBS 位相共轭镜组成双通放大 MOPA 系统,主振荡器单纵模(约 $45 \mu\text{J}$)被放大一万多倍后输出能量 $> 450 \text{ mJ}$,在频率为 40 Hz 时,输出能量的稳定性为 3.5% (RMS);

2) 采用了位相共轭、像传递、热退偏补偿及消除激光器自激等关键技术,完成了一套高重复频率大能量单纵模激光系统,可在很宽的动态范围内运转,并获得近衍射极限(< 1.3 衍射极限)光束质量;

3) 位相共轭镜的应用,在获得高反射共轭波的同时,压缩了一倍的激光脉宽, 40 Hz 时输出脉冲宽度约 8 ns ,提高了激光输出的功率密度。

参 考 文 献

- 1 C. B. Dane, L. E. Zapata, W. A. Neuman *et al.*. Design and operation of a 150 W near diffraction-limited laser amplifier with SBS wavefront correction [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(1):148~163
- 2 S. Scidel, G. Mann. High average power frequency conversion with phase conjugated laser system [C]. *SPIE*, 1996, **2788**:183~191
- 3 Hans J. Eichler, Andreas Haase, Ralf Menzel. 100-Watt average output power 1.2 diffraction limited beam from pulsed neodymium single-rod amplifier with SBS phase conjugation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(8):1265~1269
- 4 He Weiming, Lü Zhiwei, Wang Qi *et al.*. Two-cell stimulated-Brillouin-scattering systems pumped with narrow-pulse-width laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(1):46~50 (in Chinese)
- 5 Lü Baida. Laser Optics [M]. 2nd ed., Chengdu: Press of Sichuan University, 1992. 34~35 (in Chinese)
- 6 Chen Jun. Optic Phase Configuration and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 1999. 153~192 (in Chinese)
- 7 Qi. T. Lu, N. Kugler, H. Weber *et al.*. A novel approach for compensation of birefringence in cylindrical Nd:YAG rodes [J]. *Optic. and Quantum Electron.*, 1996, **28**:57~69
- 8 H. J. Eichler, A. Haase, B. Liu *et al.*. Design and construction of high power solid-state laser amplifiers with phase conjugating mirror [C]. *SPIE*, 1996, **2889**:8~19
- 9 S. Schiemann, W. Ubachs, W. Hogervorst. Efficient temporal compression of coherent nanosecond pulses in a compact SBS generator-amplifier setup [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(3):358~365