

文章编号: 1001-4322(2004)06-0712-05

种子注入的短脉冲激光器特性研究*

赵 卫¹, 王 涛¹, 朱少岚¹, 杨延龙¹, 朱宝亮²,
王屹山¹, 陈国夫¹, 程 昭¹, 刘 丽²

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 瞬态光学技术国家重点实验室, 陕西 西安 710068;

2. 北京理工大学 光电技术系, 北京 100081)

摘 要: 从 LD 泵浦固体激光器优化设计原则出发, 设计了一种微型二极管泵浦激光器, 并对种子激光器的结构和参数进行了优化。该激光器运转稳定, 输出光束质量高, 光束发散角小, 光-光转化效率为 17.4%, 斜率效率可达 24%, 输出功率可达 80mW。将此种子激光注入到调 Q 激光器中, 改善了调 Q 激光器的输出特性, 使得激光脉冲的建立时间缩短了 40ns, 输出的横模场分布得到了明显改善。

关键词: 种子注入; 调 Q 激光器; 微型激光器

中图分类号: TN242

文献标识码: A

高功率、高质量光束的短脉冲激光光源在相干检测、激光雷达、光化学、光诱导以及等离子体物理等方面有许多应用。普通高功率激光器, 由于激光增益较高而产生的多模(横模、纵模)振荡, 空间烧孔效应, 热致透镜效应和双折射效应, 都会不同程度降低输出光束质量^[1]。注入锁定技术是获得高质量、高功率激光输出的一种简单有效的方法^[2~7], 可以有效地控制激光的时间特性、空间特性和方向性等。在该技术中, 性能优良的种子激光是实现注入锁定的关键因素之一^[8]。由于 LD 泵浦薄片激光器可获得很好的基横模分布, 且体积小, 结构紧凑, 总体转换效率高^[9~11], 因而我们选用了 LD 泵浦薄片激光器作为种子激光器, 并对这种种子注入的短脉冲激光器进行了优化设计和实验研究。

1 系统构成及实验研究

实验系统主要由四部分组成, 即种子激光器、耦合系统、功率振荡器和测量装置, 如图 1 所示。

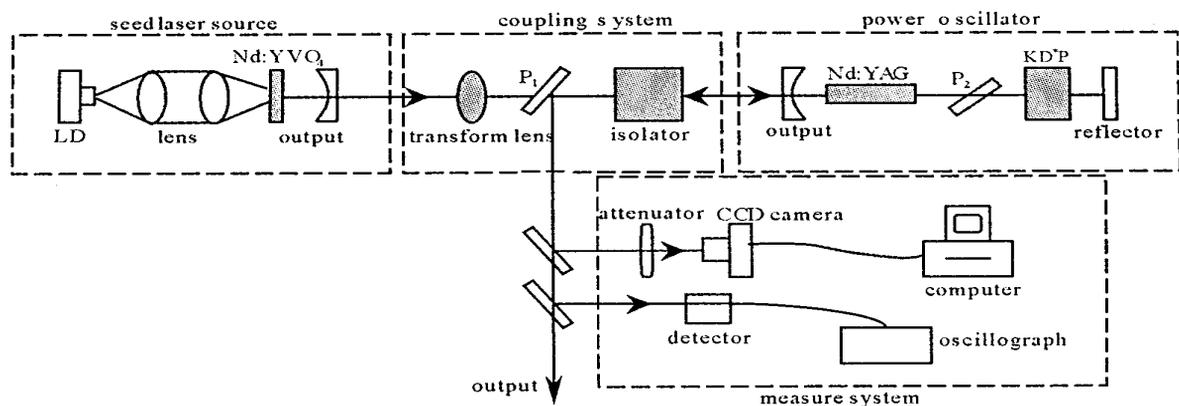


Fig. 1 Experiment scheme of seed injection

图 1 种子激光注入实验光路图

1.1 种子激光器的输出特性

实验中 Nd: YVO₄ 晶体与凹面镜放置在同一个调整架上, 与激光二极管固定在同一个平台上。通过调节凹面镜的中心位置和俯仰角来改变激光空间模式特性, 由此获得基横模输出。旋转 Nd: YVO₄ 晶体, 种子激光输出将发生变化。在某个位置, 最大输出功率可达 80mW, 由晶体性质可以确定为 偏振光。将 LD 温度设定在

* 收稿日期: 2003-03-25; 修订日期: 2003-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(60078004)

作者简介: 赵 卫(1963—), 男, 研究员, 主要从事超快光学技术研究; 西安市 80 号信箱 25 分箱。

25 ,实际温度波动小于 0.4 。由实际输入输出曲线计算 ,得到种子激光器阈值为 98mW ,光-光转换效率为 17.4 % ,斜率效率为 24 %^[8]。

使用红外探测卡 ,可以直观地观察到激光的空间模式分布。微调俯仰角 ,种子激光的场分布发生相应变化 ,由清晰的多模向基模过渡 ,最终得到亮度较高 ,光斑对称 ,光强分布均匀的基横模种子激光。用 CCD 相机记录种子激光的场分布 ,然后做图像处理 ,得到了其横向光斑分布和光强分布 ,如图 2、图 3 所示。

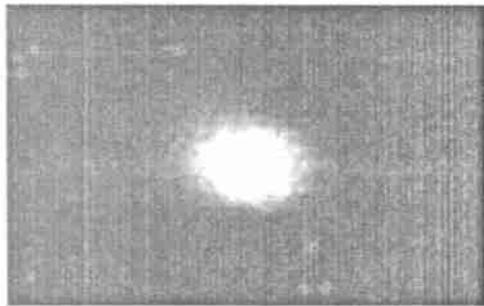


Fig. 2 Laser field of seed laser
图 2 种子激光器光斑

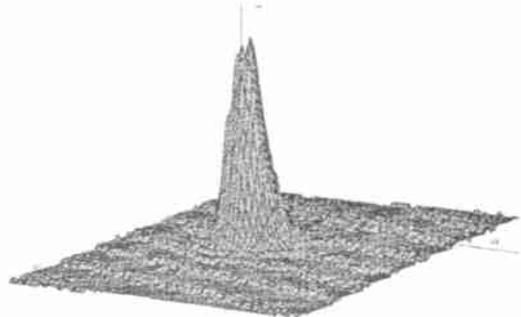


Fig. 3 Intensity profile of seed laser
图 3 种子激光器光强分布

很明显 ,光强的空间分布基本对称 ,且只有一个极大值 ,说明场分布为基横模。实验结果表明 ,对此微型种子激光器的优化设计获得了较好的空间分布 (基横模) 和高的斜率效率 (24 %) ,同时具有较高的输出功率 (80mW) ,满足种子激光器的要求。

1.2 模式匹配的分析 and 设计

种子注入的模式匹配主要考虑的是横模匹配。如果基横模场不匹配将会降低基横模本征模式耦合效率 ,从而影响基横模的质量 ;对于能量的传输 ,高级本征模式往往具有较大的传输损耗 ,不匹配将造成能量的损耗 ;另外 ,由于激光是在微弱的自发辐射噪声的基础上增长起来的 ,而种子注入信号强度比噪声场强度大得多 ,所以模式匹配的好坏将会影响到腔内种子光分布及强度 ,对功率激光器脉冲建立的时间特性也会有很大的影响。所以有必要对模式匹配进行分析 ,以便优化系统参数。在两光束束腰的纵向和横向位置及传输方向相同的情况下 ,基横模耦合系数为^[1]

$$C = \frac{2}{10} \frac{2}{20} \exp\left(-\frac{2}{10} - \frac{2}{20}\right) d d \tag{1}$$

式中： 10 , 20 分别为种子激光器与功率振荡器的束腰半径 ,积分后可得

$$C = 2 \frac{10}{20} / \left(\frac{2}{10} + \frac{2}{20}\right) \tag{2}$$

当 $10 = 20$ 且 $C = 1$ 时 ,种子激光器能量全部耦合到功率振荡器的基横模中 ,种子激光系统与功率振荡器横模实现匹配。

实验系统中 ,种子激光器和功率振荡器均采用平凹腔结构 ,如图 1 所示。种子激光器的束腰在 Nd:YVO₄ 薄片的端面上 ,功率振荡器的束腰则在平面镜上。为了使两个基模匹配 ,在两个激光器之间加入一焦距为 f 的薄透镜 ,使种子激光器基模的高斯光束经过变换后 ,其束腰半径位于功率振荡器的平面镜上 ,即 $1 = 20$,即满足模式匹配的要求 ,此时功率振荡器的基横模增益最大 ,高阶模被抑制。

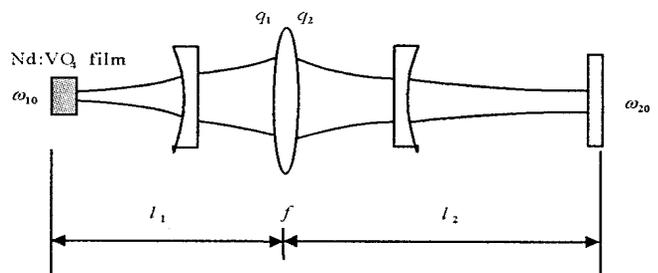


Fig. 4 Sketch of mode matching system
图 4 实验系统模式匹配的光路示意图

模式匹配时 ,透镜的位置是固定的。如图 4 所示 ,假设两个参考面上的高斯光束参数用 q_1 和 q_2

表示 ,而该两个平面间的变换矩阵为 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$,根据 ABCD 定律

$$q_2 = (q_1 A + B) / (q_1 C + D) \tag{3}$$

以及

$$q_1 = l_1 + i Z_{01} = l_1 + i \frac{2}{01} / , \quad q_2 = - l_2 + i Z_{02} = - l_2 + i \frac{2}{02} / \tag{4}$$

经透镜变换后有

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{q_1} - \frac{1}{f} \quad (5)$$

联立方程 (3) ~ (5) 可得

$$\begin{cases} f^2 - Z_{01} Z_{02} = (l_1 - f)(l_2 - f) \\ (l_1 - f) Z_{02} = (l_2 - f) Z_{01} \end{cases} \quad (6)$$

解此方程组,得

$$\begin{cases} l_1 = f \pm \sqrt{f^2 - f_0^2} \\ l_2 = f \pm \sqrt{f^2 - f_0^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $f_0 = Z_{01} Z_{02}$ 。所以当 Z_{01} 和 Z_{02} 确定后, l_1 和 l_2 有无穷多组解,按实际情况只需选定其中一个参数,就可以求得另外两个参数。取 $f = 250\text{mm}$,由方程 (7) 得到 $l_1 = 248.58\text{mm}$, $l_2 = 1012.934\text{mm}$ 。实验中,种子激光器与高功率振荡器的模式匹配按此数据设计。

2 种子注入的功率振荡器输出特性实验

2.1 光路调节

实验中当种子光输出功率最大时,其偏振方向就相应地确定了,此时需调节 P_1 ,使 P_1 与种子光偏振方向一致,保证种子光以最大功率注入。实验光路调节方法为:先调节法拉第隔离器,确保其各反射面的光斑与准直光斑重合;其次要旋转 P_2 ,使 P_1 与 P_2 的偏振方向成 45° 角,确保准直光无法反向通过 P_1 ,只有当准直光无法向左(见图 1)通过时,才可进行种子注入光的调整;从 P_1 或 P_2 处接收准直光斑,并将其调整重合;最后将种子光注入,利用红外探测卡再次在 P_1 或 P_2 处接受种子光斑和 Q 脉冲光斑,微调腔镜,使两个光斑完全重合,确保 Q 脉冲无法反向通过 P_1 注入到种子激光器。

2.2 种子注入对时域的影响

注入的种子光一般会影响振荡光的空间模式分布、时间特性和频率特性。实验中,将 Q 开关的触发(减压)信号和激光信号同步触发数字示波器,便可记录下种子注入前后 Q 开关触发信号与光信号波形的时间差异。Q 开关触发信号为 1000V 。在 Q 触发信号附近的区域,我们采用示波器探头感应接受触发的电磁波,由于仅关心触发信号的前沿,所以可不考虑其后的感应振荡。记录的时域波形如图 5 所示。

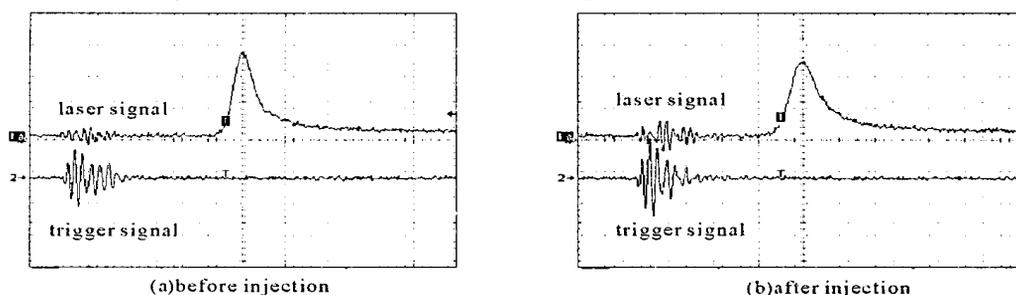


Fig. 5 Setup time of laser pulse at 350V

图 5 泵浦电压为 350V 下种子注入前、后脉冲的建立时间

种子注入前激光脉冲的建立时间为 210ns ,注入后为 170ns ,激光脉冲建立时间缩短了 40ns 。为了排除干扰,我们进行了几十次测量,得到的结果一致。脉冲建立时间较注入前有明显地缩短,可见注入激光对 Q 脉冲产生了作用。由于注入前初始激光在相对很弱的自发辐射噪声中建立,脉冲建立时间较长,而注入后较强的种子光成为激光建立的初始光场,因而建立时间较短。

提高泵浦能量,即增加了初始自发辐射噪声的强度,实验中,我们发现激光的脉冲建立时间也变短。提高泵浦电压后,通过与种子注入前、后脉冲建立时间的比较,由图 6 可以看出,泵浦电压在 450V 时,种子注入前后脉冲建立时间基本不变;而泵浦电压在 350V 时,种子注入前、后脉冲建立时间明显缩短了 40ns 。可见提高高功率振荡器泵浦电压后,注入种子的作用减弱。

2.3 对空间模式的影响

用 CCD 图像采集系统检测功率振荡器输出的光场分布,结果如图 7 所示。可以看出,种子注入光明显改善了振荡光的模式特性,振荡光强度分布的对称性、均匀性好于注入种子前,因此注入种子能明显改善高功率振荡光的空间分布。

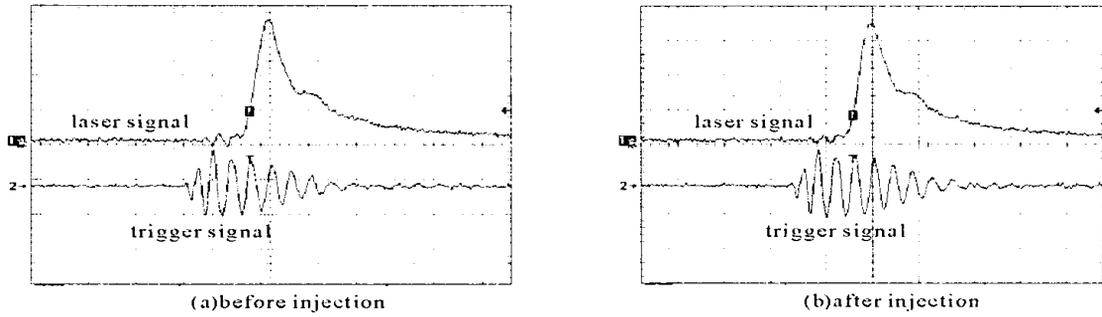


Fig. 6 Setup time of laser pulse at 450V
图 6 泵浦电压为 450V 下种子注入前、后脉冲的建立时间

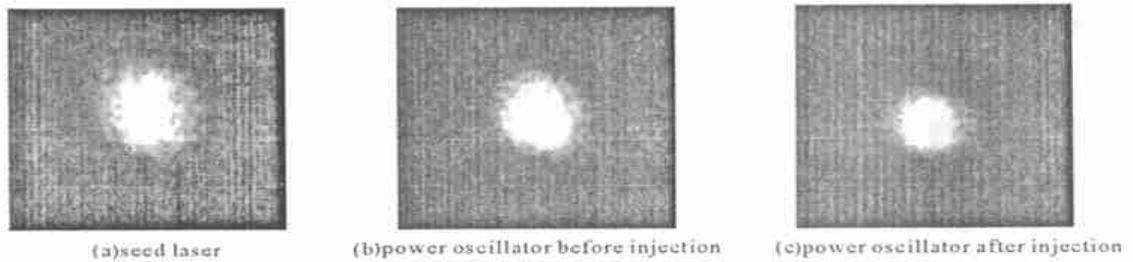


Fig. 7 Comparison of laser field
图 7 种子注入前后光斑对比。(a) 种子光分布,(b) 注入前振荡光分布,(c) 注入后振荡光分布

对比种子光与种子注入前、后光斑基横模的变化,可以看出,种子光对振荡光的模式有所改善,功率振荡器的输出场的强度分布与种子激光的强度分布很相似,可见种子注入后振荡光以种子光的场分布建立振荡,这也正是种子注入的特点。

3 分析与结论

种子激光的功率、振荡光的泵浦能量、变换透镜的位置对种子注入的作用有重要的影响。当改变种子激光器的输出功率时,功率振荡器的输出特性也将发生变化。将 LD 电流由 700mA 增加为 850mA,种子注入的作用加强,种子注入后振荡器激光的脉冲建立时间缩短了约 10ns。由于激光二极管的工作电流最低为 700mA,仍有种子注入作用,所以我们无法实验测得最低种子注入阈值。

当功率振荡器的泵浦能量提高后,通过种子注入前后脉冲建立时间的比较可以看出,泵浦电压在 350V 时,种子注入前后脉冲建立时间缩短了 40ns;泵浦电压在 450V 时,种子注入前后激光脉冲建立时间基本不变。可见提高功率振荡器泵浦电压后,注入种子的作用减弱。

变换透镜的主要作用是匹配种子光与振荡光模式。实验中,当没有透镜时,脉冲建立时间为 140ns,用透镜匹配时,脉冲建立时间缩短了 30ns。可见,模式匹配对于种子注入效率有明显的影响。这是因为在模式匹配时,种子光的场分布完全位于基模体积以内,此时基模的增益最大,高功率脉冲的模式特性得到改善,趋向于基横模分布。

另外,种子注入前、后,激光脉冲波形有较大的变化,如图 8 所示。种子注入前,脉冲并不很光滑,而是出现小的调制;当种子激光注入后,在同样条件下,脉冲波形较为光滑。这是因为种子注入用的微型激光器,其腔长非常短,造成种子激光器的纵模数较少,当种子激光注入到功率振荡器后,它不但可控制功率振荡器的时域、空间域特性,而且还控制功率振荡器的频域特性,即功率振荡器振荡模式受种子激光束的影响,在功率振荡器中的纵模数较少,脉冲波形较注入前光滑。所以种子注入改善了功率振荡

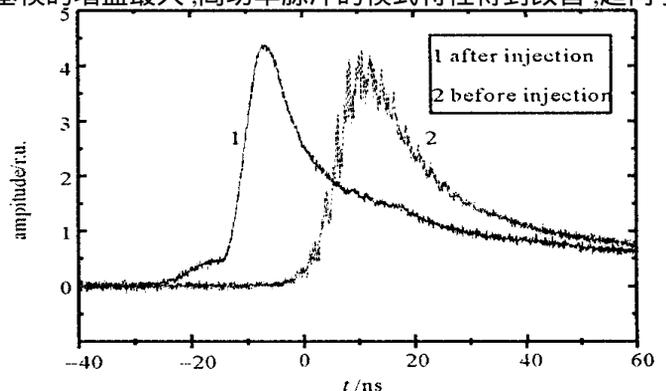


Fig. 8 Pulse shape before and after injection
图 8 种子注入前、后脉冲形状对比

器的时域、空间域甚至频域特性,是获得高光束质量输出的一种有效的方法。

参考文献:

- [1] Barnes N P, Barnes J C. Injection seeding I: theory[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, **29**(10):2670—2683.
- [2] Park Y K, Giuliani G, Byer R L. Stable single-axial-mode operation of an unstable-resonator Nd:YAG oscillator by injection locking[J]. *Optics Letters*, 1980, **5**(3):96—98.
- [3] Alcock A J, Corkum P B, James D J, et al. Selection of single, mode locked CO₂ laser pulses by semiconductor reflection switching[J]. *Optics Comm*, 1976, **18**:543—545.
- [4] Bigio I J, Slatkine M. Injection-locking unstable resonator excimer lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1983, **19**(9):1426—1436.
- [5] Zayhowski J J, Mooradian A. Frequency-modulated Nd:YAG microchip lasers[J]. *Optics Letters*, 1989, **14**(12):618—620.
- [6] Singh U N, Yu J R, Petros M, et al. Injection-seeded room-temperature diode pumped Ho:Tm:YLF laser with output energy of 600mJ at 10 Hz [J]. *OSA TOPS*, 1998, **19**:194—196.
- [7] Yu J R, Singh U N, Barnes P, et al. 125mJ diode-pumped injection-seeded Ho:Tm:YLF laser[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(10):780—782.
- [8] 赵卫,王涛,杨延龙,等.用于种子注入的微型二极管泵浦激光器[J].光子学报,2003,**32**(6):786—789. (Zhao W, Wang T, Yang Y L, et al. Minidiode-pumped laser for seed injection. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6):786—789)
- [9] Kintz G J, Baer T. Single-frequency operation in solid-state laser materials with short absorption depths[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, **26**(9):1457—1459.
- [10] Couillaud B, Ducasse A, Freysz E. Experimental study of the injection-locked continuous-wave ring dye laser[J]. *Optics Letters*, 1984, **9**(10):435—437.
- [11] Sasaki T, Kojima T, Yokotani A. Single-longitudinal-mode operation and second-harmonic generation of Nd:YVO₄ microchip lasers[J]. *Optics Letters*, 1991, **16**(21):1665—1667.

Characteristic of injection-seeding Q-switch laser

ZHAO Wei¹, WANG Tao¹, ZHU Shao-lan¹, YANG Yan-long¹, ZHU Bao-liang²,
WANG Yi-shan¹, CHEN Guo-fu¹, CHENG Zhao¹, LIU Li²

(1. State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
P. O. Box 80-25, Xi'an 710068, China;

2. School of Opto-Electrics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: According to the optimization principle for diode-pumped laser, one kind of mini diode-pumped laser for seed-injection is designed. Using the numerical method, the optimized design is presented laser gain media, coupling system and resonant cavity. The seed laser beam from mini diode-pumped laser was injected into Q-switched laser and output characteristics of Q-switched laser were studied. The experiment results show that this laser is stable, with high beam quality and small light beam divergence. The light-light efficiency is 17.4% and slope efficiency is 24%. The output power of this laser is about 80mW. The buildup time of laser pulse in power oscillator decreases by 40ns and the injected-seed laser field improve the distribution of output laser field.

Key words: Seed-injection; Q-switch laser; Diode-pumped mini laser