

文章编号: 0258-7025(2004)05-0527-04

# MOPA 激光系统中 LD 抽运的单纵模主振荡器

刘 朗<sup>1</sup>, 秘国江<sup>1\*</sup>, 黄茂全<sup>2</sup>

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

**摘要** 在高重复频率、高光束质量的主振荡功率放大器(MOPA)激光系统中,要求主振荡器输出的激光束具有稳定平滑的时间和空间分布,以及长的相干长度,即要求百分之百的单纵模几率和 TEM<sub>00</sub> 模输出。随半导体激光器(LD)技术的进展,LD 抽运的固体激光器(DPSL)逐步成为 MOPA 激光系统中主振荡器的首选。故研究 LD 抽运单纵模固体激光器,对提高 MOPA 激光系统的性能,推动 MOPA 激光系统的发展和应用都具有重要的意义。通过合理排列光学元件在谐振腔中的位置,控制 LD 聚焦点在 Nd:YAG 中的深度,大大减小驻波效应对模式的影响,研制成功 LD 端面抽运,并采用消除 LN 晶体电光调 Q 中“光弹效应”技术的固体激光器。不用附加选模元件,获得 50~100 μJ 较大能量的单纵模激光。在重复频率 40 Hz 时,输出能量 90 μJ,脉宽约 12 ns,长时间运转保持单纵模几率 100%,能量稳定性±1.5%,满足了 MOPA 激光系统对主振荡器的要求。

**关键词** 激光技术;单纵模;LD 端面抽运;驻波效应

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Research of Single-Longitudinal-Mode Main Oscillator Pumped by LD in MOPA System

LIU Lang<sup>1</sup>, BI Guo-jiang<sup>1</sup>, HUANG Mao-quan<sup>2</sup>

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

**Abstract** In the MOPA system, the smooth spatial and temporal shapes and a long coherent length of the output laser pulses are the essential requirement to the master-oscillator. With the development of DPSL, it becomes the first choice of the master-oscillator in the MOPA laser system. In this paper, a single-longitudinal-mode DPSL with short length resonator and end-pumped Nd:YAG using LN Q-switching is presented. Through arranging the optical components in the resonator reasonably, controlling the depth of the focusing point in the Nd:YAG, decreasing the effects of the stationary waves to laser mode, and without using any special selecting-mode component, the single-longitudinal-mode output energies of 50~100 μJ are attained. On the repetition of 40 Hz, the following performance are achieved: output energy 90 μJ, pulse width about 12 ns, single-longitudinal-mode probability 100%, energy stability±1.5%. In addition, the DPSL is used as a master oscillator in Nd:YAG MOPA systems, and good results are obtained.

**Key words** laser technique; single-longitudinal-mode; LD end-pumped; effect of stationary wave

## 1 引 言

在主振荡功率放大器(MOPA)激光系统中,对主振荡器的要求是:便于 MOPA 系统精确光电控制的声光(AO)或电光(EO)调 Q,输出能量和脉冲宽

度稳定,重复频率大范围变化而光束质量不变,最主要的是输出激光束具有稳定平滑的时间和空间分布,以及长的相干长度。也就是说,要求百分之百的单纵模几率和 TEM<sub>00</sub> 模输出。而半导体激光器(LD)抽运 Nd:YAG 单纵模固体激光器(DPSL)以

收稿日期:2003-02-17;收到修改稿日期:2003-04-17

作者简介:刘 朗(1955—),男,华北光电技术研究所研究员,主要从事固体激光技术研究。

\* 通信联系人。E-mail:bi\_gj@eyou.com

其高重复频率、高光束质量成为 MOPA 激光系统理想的抽运源。因此,研究 LD 抽运单纵模固体激光器,对提高 MOPA 激光系统的性能,推动 MOPA 激光系统的发展和應用都具有重要的意义。

LD 抽运 DPSL 选单纵模的方法繁多,但应用于 MOPA 激光系统的固体激光器大致有单向环形腔法和扭转模法,也可采用复合腔标准具和双折射滤波器等其他的选择单纵模措施。具有代表性的是美国相干公司研制的商品级 MOPA 激光器,其中作为主振荡器的 LD 抽运激光器采用了声光调 Q,单向运转的环形腔,主要技术指标是重复频率 10~100 Hz,单纵模输出能量 30  $\mu\text{J}$ ,脉冲宽度 8 ns<sup>[1]</sup>。我们在研制 MOPA 激光器的同时,研制成功 LD 光纤耦合声光调 Q 的直线型 Nd:YAG 单纵模激光器,输出能量 30  $\mu\text{J}$ ,脉冲宽度 15 ns,重复频率 40 Hz,单纵模几率 100%。但与 MOPA 系统联调时,受现有光学元件的限制,放大级抽运能量不能太高,系统输出能量与设计指标相差较大。尝试提高 LD 的抽运功率,但单纵模几率下降,插入标准具等其他选单纵模元件,反而因插入损耗增大使输出能量降低。由理论分析和实验检验,通过合理设计谐振腔,利用 LD 抽运时 Nd:YAG 激活区域轴向增益非均匀分布的特点和均匀加宽介质的自选模特性,介入铌酸锂(LN)电光调 Q 开关,不用附加选纵模元件,实现了电光调 Q 单纵模激光输出。在重复频率 40 Hz

时,获得输出能量 90  $\mu\text{J}$ ,脉冲宽度约 12 ns,长时间运转保持单纵模几率 100%,满足了 MOPA 激光系统对主振荡器的要求。

## 2 工作原理

在端面抽运直线型短腔长的 DPSL 的几何结构中,LD 经光纤耦合可输出规则的圆光束,聚焦在 Nd:YAG 中,径向产生对称、圆整的激活区域。在适当抽运功率下,很容易控制 TEM<sub>00</sub> 模运转。一般认为,直线谐振腔的驻波引起的“空间烧孔”效应导致多纵模运转,但仔细分析可知,只要尽量缩短腔长,拉大纵模间隔,合理选择 Nd:YAG 的尺寸,安排其在谐振腔中的位置,并控制聚焦点在 Nd:YAG 中的深度,就可以大大减小驻波效应的影响。

在简化条件下,假设谐振腔内有频率为  $\nu_q$  的优势模和增益最接近优势模的频率为  $\nu_{q-1}$  的相邻模,其在谐振腔两端形成驻波的波节和波腹几乎重叠,而在腔的中间  $\nu_q, \nu_{q-1}$  的波节和波腹都相距大致为四分之一波长。也就是说只有在谐振腔内中间部位,优势模  $\nu_q$  消耗波腹处的反转粒子数  $\Delta n$ ,其波节处剩余反转粒子数对相邻模  $\nu_{q-1}$  振荡影响较大,有可能使  $\nu_q$  和  $\nu_{q-1}$  模都获得足够高的增益,使两个纵模使用空间不同位置的反转粒子数同时形成振荡输出,如图 1 所示。

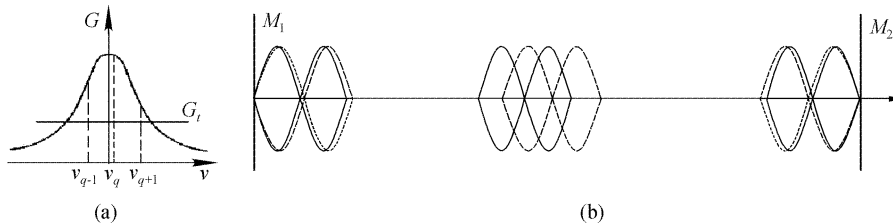


图 1 (a) 增益曲线示意图;(b) 谐振腔内驻波示意图

Fig. 1 (a) Plot of gain curve; (b) Stationary waves in resonator

根据以上分析,LD 端抽运电光调 Q 单纵模固体激光器中,短增益介质 Nd:YAG 的一端镀 1.06  $\mu\text{m}$  全反膜作为谐振腔后反射镜,仔细调整 LD 抽运光的焦长和聚焦在 Nd:YAG 中距全反膜的位置,增大优势模  $\nu_q$  和相邻模  $\nu_{q-1}$  的共用反转粒子数,为充分发挥均匀加宽介质 Nd:YAG 晶体的自选模特性创造条件。同时由于抽运光聚焦在端面附近,沿轴向(纵向)的增益分布是不均匀的,端面处(焦点处)反转粒子数密度最大,增益最高,沿轴向反转粒子数密度和增益急剧下降,进一步加大了优势模  $\nu_q$  和相邻

模  $\nu_{q-1}$  的共用反转粒子数。微调焦点的位置拉大优势模  $\nu_q$  和相邻模  $\nu_{q-1}$  的增益差,从而大大增强了优势模  $\nu_q$  对相邻模  $\nu_{q-1}$  在时间和空间上的竞争力。这样优势模  $\nu_q$  能快速形成振荡并抽空反转粒子数  $\Delta n$ ,迫使相邻模  $\nu_{q-1}$  和其他大于阈值增益  $G_t$  的模的增益降到阈值增益  $G_t$  以下而被抑制掉。这一点与 LD 侧面抽运时增益沿增益介质轴向(纵向)近似均匀分布是完全不同的。

另一方面,频率为  $\nu$  的单纵模在腔内由自发辐射光子数  $\Phi_i$ ,经多次往返到达振荡建立  $\Phi_D$ <sup>[2]</sup>,即

$$\Phi_D = \Phi_i \exp[(G_v^0 - G_t)2nl] \quad (1)$$

其中  $l$  为腔长,  $n$  为光子数  $\Phi$  由初始自发噪声  $\Phi_i$  增长到  $\Phi_D$  时在腔内往返的次数, 与其对应的脉冲建立时间为  $\Delta t_{D_v} = 2nl/c$ 。对于谐振腔内的优势模  $\nu_q$  和相邻模  $\nu_{q-1}$  分别有

$$\Phi_D = \Phi_i \exp[(G_{\nu_q}^0 - G_t)\Delta t_{D_{\nu_q}} C] \quad (2)$$

$$\Phi_D = \Phi_i \exp[(G_{\nu_{q-1}}^0 - G_t)\Delta t_{D_{\nu_{q-1}}} C] \quad (3)$$

比较式(2),(3)有

$$(G_{\nu_q}^0 - G_t)\Delta t_{D_{\nu_q}} = (G_{\nu_{q-1}}^0 - G_t)\Delta t_{D_{\nu_{q-1}}} \quad (4)$$

由于优势模增益大于相邻模的增益, 即  $G_{\nu_q}^0 > G_{\nu_{q-1}}^0$ , 可知优势模脉冲建立时间要快于相邻模脉冲的建立时间:  $\Delta t_{D_{\nu_q}} < \Delta t_{D_{\nu_{q-1}}}$ 。设优势模  $\nu_q$  比相邻模  $\nu_{q-1}$  的增益大一倍, 即:  $(G_{\nu_q}^0 - G_t) = 2(G_{\nu_{q-1}}^0 - G_t)$ , 可知相邻模  $\nu_{q-1}$  比优势模的脉冲建立时间要长一倍, 即  $\Delta t_{D_{\nu_{q-1}}} = 2\Delta t_{D_{\nu_q}}$ 。从而优势模  $\nu_q$  首先形成振荡消耗掉  $\nu_q$  和  $\nu_{q-1}$  共用的反转粒子数  $\Delta n$ , 而相邻模  $\nu_{q-1}$  及其他增益大于  $G_t$  的模还没有形成振荡, 却由于反转粒子数的减少, 其增益很快下降到阈值增益  $G_t$  以下被抑制掉。

对于短腔长, 小能量高重复频率的单纵模固体激光器, 选用 LN 作为 Q 开关具有尺寸小、损耗小、无潮解、环境温度影响小、横向加压、开关电压低等优点。但是 LN 晶体在长期重复受单向加压电场的作用下“光弹效应”严重, 开关性能明显变坏, 使得输出能量下降, 甚至停止工作。通常解决的办法是对 LN 施加正反向交替的高压, 以抵消光弹效应。但在实验中发现, LN 对高压的响应并不对称, 正负高压幅度相等情况下, 激光脉冲输出大小交替出现, 或出现周期递减的涨落现象。我们研制出正、负高压对的加压式调 Q 驱动源, 以正高压调 Q 输出激光脉冲, 随后在反转粒子数还未积累起来之时, 施加负高压消除“光弹效应”, 而且正、负高压幅度分别可调, 使调 Q 和消光弹效应都可工作在最佳状态。正负

高压如图 2 所示。

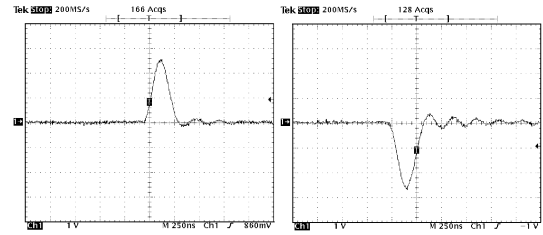


图 2 LN 晶体调 Q 正、负高压

Fig. 2 Shape of positive and negative Q-switched voltage

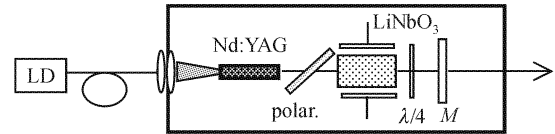


图 3 LN 调 Q 的单纵模 DPSL 光路

Fig. 3 Configuration of LN Q-switched single-longitudinal-mode DPSL

### 3 实验结果

研制的短直线式 LD 抽运, LN 调 Q 的单纵模固体激光器光路如图 3 所示。其中, LD 为带光纤耦合输出的 5 W 半导体激光器, 中心波长 808 nm ( $T = 19^\circ\text{C}$ ), 经透镜组耦合聚焦在  $\phi 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  Nd:YAG 晶体(掺杂浓度 1.1 at.-%)上, Nd:YAG 晶体一端镀  $1.06 \mu\text{m}$  高反, 808 nm 高透, 另一端镀  $1.06 \mu\text{m}$  高透, 以 LN( $4 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ )调 Q 晶体和  $\lambda/4$  波片及偏振片 P 组成升压调 Q 方式, 输出镜为平面镜,  $1.06 \mu\text{m}$  透射率为 40%。按最紧凑直线型排列光学元件, 尽量缩短谐振腔长, 以拉大纵模间隔。YAG 晶体用铝箔紧包, 放入带散热片的热沉中, 热沉与激光器件外壳紧密固定, 整个系统密封, 以利于固体激光器工作在稳定的温度状态下。实验结果为: 工作重复频率 40 Hz 时, 以 EPM1000 能量计测得输出能量  $\sim 100 \mu\text{J}$ , 能量不稳

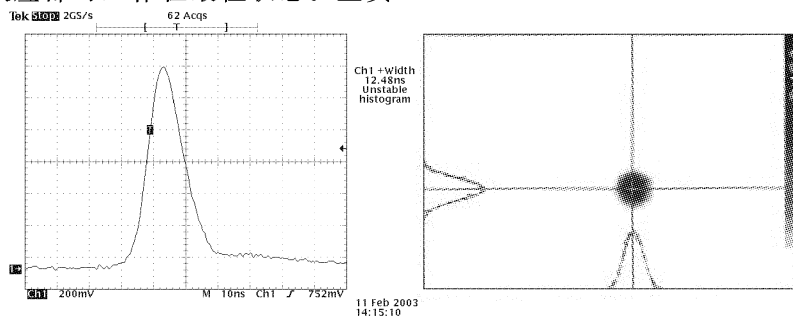


图 4 输出脉冲的时间和空间波形

Fig. 4 Temporal and spacial shape of single-longitudinal-mode laser pulse

定性优于 $\pm 1.5\%$ ,以 TEX(TDS380)存储示波器(400 MHz)测量脉宽,约 12 ns,波形光滑,没有观察到多纵模特有的“拍频”现象,以 CCD 空间分布仪测试,光斑分布对称, $x$ 轴  $y$ 轴高斯符合率均大于 97%。如图 4 所示。

以此固体激光器作为一台 MOPA 激光器的主振荡器,获得受激布里渊散射(SBS)位相共轭池的反射率大于 70%,稳定性很好。在重复频率 40 Hz 时,脉冲能量大于 450 mJ,脉冲宽度 7 ns,单纵模几率 100%,光束质量达 1.1~1.2 倍衍射极限。长期观察 MOPA 激光系统数月,没有发现因固体激光器模式特性变坏引起 SBS 反射率下降,造成 MOPA 激光系统输出大幅涨落的现象。应用于另一台大型

Nd:YAG 激光系统,10 Hz 运行时,获得脉冲能量大于 6 J,脉冲宽度小于 4 ns,单纵模几率 100%,发散角 1.7 mrad 的结果。

### 参 考 文 献

- 1 Chen Jun. Optic Phase Conjugation and Application [M]. Beijing: Science Press, 1999. 167~171  
陈 军. 光学位相共轭及其应用[M]. 北京:科学出版社,1999. 167~171
- 2 Lan Xinju. Laser Technology [M]. Beijing: Science Press, 2000. 70~71  
蓝信钜 等编著. 激光技术[M]. 北京:科学出版社,2000. 70~71
- 3 Walter Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. New York Heidelberg Berlin: Springer-Verlag, 1976. 228~229

• 广告

|  |  |   |         |         |        |  |
|--|--|---|---------|---------|--------|--|
|    | <h2>上海瀚宇光纤通信技术有限公司</h2>  |   |         |         |        |  |
| <h3>Your Reliable Partner to R&amp;D in Laser Optics and Fiber Optics</h3>   |  |   |         |         |        |  |
|  <p>SLD 系列产品</p>  <p>特种光纤</p>  <p>大功率泵浦</p>  <p>偏振控制产品</p> | <p>上海瀚宇光纤通信技术有限公司是一家专业致力于服务国内光通信领域科研机构,高校,企业的研究人员的专业公司.为国内光通信领域的研究,试验,新产品开发等项目提供支持.</p> <p>上海瀚宇和世界上许多知名公司和大学保持着良好的技术和市场方面的合作,致力于建立面向全球的多渠道合作体系,为国内的光通信领域的研发提供高端的器件和相关产品,从而推进国内光通信领域的进步.</p> <p>上海瀚宇立足于持续提供全球领先的技术和产品,服务的领域包括:</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>光纤传感领域</td> <td>光纤激光器领域</td> </tr> <tr> <td>光纤放大器领域</td> <td>激光应用领域</td> </tr> </table> <p>上海瀚宇目前能够提供比较丰富的产品:</p> <p>光偏振控制以及保偏产品系列</p> <p>特种光器件系列</p> <p>特种光纤系列</p> <p>高端光纤激光器, 高端光纤放大器系列</p> <p>高功率泵浦激光器系列</p> <p>普通光无源器件等</p> | 光纤传感领域  | 光纤激光器领域 | 光纤放大器领域 | 激光应用领域 |  <p>保偏器件</p>  <p>特种光器件</p>  <p>普通光无源器件</p>  <p>高端光纤激光器</p> |
| 光纤传感领域   | 光纤激光器领域  |   |         |         |        |  |
| 光纤放大器领域  | 激光应用领域   |   |         |         |        |  |
| <p>公司地址: 上海市闵行区剑川路 910 号 2 号楼 3 楼</p> <p>公司电话: 021-54704521; 021-54704615</p> <p>公司邮件: <a href="mailto:business@shconnet.com.cn">business@shconnet.com.cn</a></p>  |  | <p>邮政编码: 200240</p> <p>公司传真: 021-54704522</p> <p>公司网站: <a href="http://www.shconnet.com.cn">www.shconnet.com.cn</a></p> |         |         |        |  |