

高峰值功率窄线宽固体激光器技术

冯江, 陈国, 罗旭, 李久喜, 何利杰, 侯天禹

(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要:报道了一种高峰值功率、窄线宽、高光束质量的主动调Q脉冲固体激光器,具有体积小、结构紧凑、环境适应性强等优点。采用LD侧面空间补偿泵浦、升压式RTP晶体电光调Q、利用布拉格体光栅VBG压窄线宽等技术。在工作频率20 Hz时,获得了脉冲宽度10 ns,单脉冲能量200 mJ,光束发散角2 mrad,在室温25 ℃时,中心波长1064 nm,中心波长漂移量 ≤ 0.05 nm,线宽(半高宽) ≤ 0.1 nm的激光输出。

关键词:高峰值功率;窄线宽;体光栅;固体激光技术

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.06.011

Solid state laser with high peak power and narrow line width

FENG Jiang, CHEN Guo, LUO Xu, LI Jiu-xi, HE Li-jie, HOU Tian-yu

(Key laboratory of solid state laser technology, Beijing 100015, China)

Abstract: An active q-switched solid-state laser with peak power, narrow linewidth and high beam quality is reported in this paper. It has the advantages of small size, compact structure and strong environmental adaptability. LD side-pumping and space-compensating, active RTP Q-switched, volume Bragg grating technologies are used in the laser. At the working frequency of 20 Hz, the obtained pulse width is 10 ns, the single-pulse energy is 200 mJ, and the beam divergence angle is 2 mrad. At room temperature 25 ℃, the laser of center wavelength of 1064 nm, central wavelength drift ≤ 0.05 nm, $\Delta\lambda \leq 0.1$ nm is obtained.

Key words: high peak power; narrow line width; volume Bragg grating; solid state laser technology

1 引言

高峰值功率窄线宽固体激光器作为激光测距系统的光源,不仅可以较大幅度地提高测距系统测距能力,还使得新型单光子测距机制的实际应用有了可能。同时,高峰值功率窄线宽固体激光器在高精度光谱、超远距离传感和激光雷达等方面具有非常广泛的应用。

获得窄线宽激光的方法有环形腔法、F-P标准具法、Q开关法、短腔法、复合腔法等多种方法,应用这些方法的激光器有结构复杂、体积大、温度敏感、机械性能差、损伤阈值低等诸多缺点,长期工作可靠

性不能保证,且环境温度适应性差,产品难以工程化,更无法适应极端环境下使用要求。

本文研究了一种使用布拉格体光栅(VBG)作为全反镜的高峰值功率、窄线宽、高光束质量的主动调Q固体激光器,其具有体积小、结构紧凑、环境适应性强、易于工程化等优点,适合用于各种恶劣环境条件下,具有广泛的应用前景。

2 技术方案

根据实际可能的应用环境,充分考虑激光器系统紧凑性,提出反射式体布拉格光栅谐振腔方案,激光器的光学原理图如图1所示。总体方案是:采用

高峰值功率、准连续梯形结构的激光二极管对称侧面泵浦 Nd:YAG 晶体,实现高功率泵浦光的均匀注入;谐振腔由反射式体布拉格光栅(VBG)组成的平凸腔,其中 VBG 选纵模的同时具有输出镜的作用,通过对 VBG 的控温,实现最大增益谱线输出,同时

压窄激光器线宽,能够实现输出谱线与接收响应波长的精确匹配;调 Q 方式为双磷酸氧钛铷晶体(RTP)升压调 Q,由于 RTP 抗损伤阈值高,不潮解,横向加压,半波电压低,温度不敏感等特性,能够很好地满足极端使用环境要求。

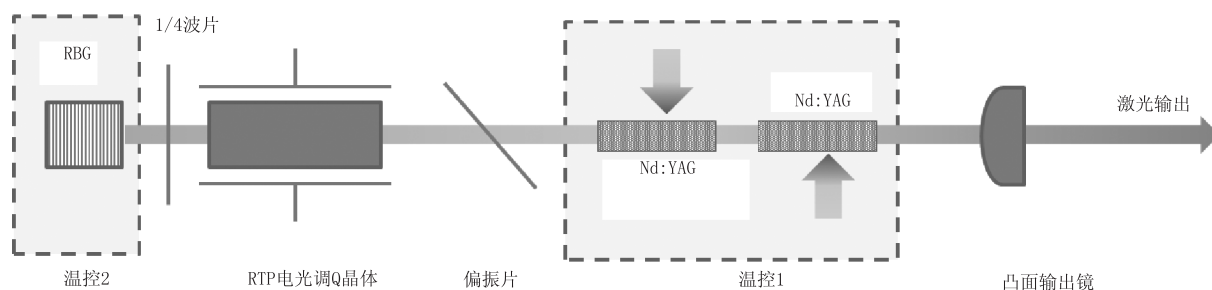


图1 激光器的光学原理图

Fig.1 Optical principle of laser

2.1 侧泵空间补偿泵浦方案

泵浦模块采用空间补偿结构,考虑到泵浦均匀性和泵浦区与腔模的匹配,泵浦方式采用环形空间补偿 LD 侧面泵浦方式。LD 通过导热材料与紫铜热沉接触,热沉下面是半导体制冷器,半导体制冷器与散热器相接,通过轴流风机将热量散掉。Nd:YAG晶体为激光工作介质,通过与金属热沉接

触,经过传导散热。调 Q 采用双 RTP 升压方式,实现窄脉冲激光输出。

采用多边形二极管直接泵浦,效率较高,而且在理论上可以得到理想的荧光分布,应用计算机软件对多边形泵浦方式理论上可以达到的荧光分布情况进行了模拟分析,荧光分布已达理想的分布。

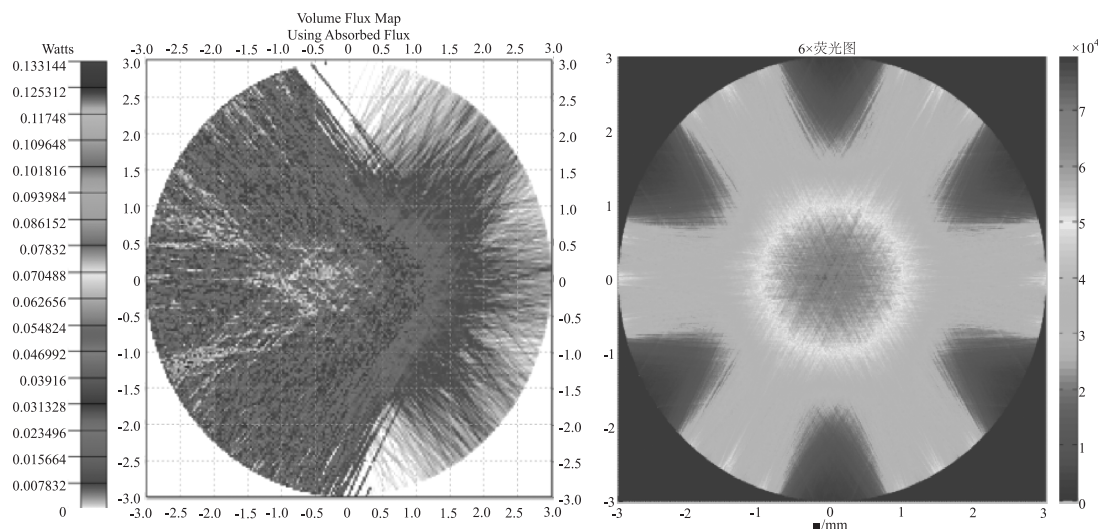


图2 计算机模拟的多边形空间补偿 LD 侧面泵浦模块的荧光分布图

Fig.2 Fluorescence distribution pictures of computer simulation

2.2 反射式体布拉格光栅(VBG)谐振腔实现窄线宽

为了获得窄的激光谱线宽度,体光栅的折射调制率 δn 和厚度 t 等参数的设计非常重要。本项目采用反射式体布拉格光栅(RBG)作为全反镜,主要考虑到 RBG 加工难度大,成本高的问题,这样的结构既可以压窄线宽同时还可以通过调节输出镜透过

率、曲率等参数获得激光器的最佳工作状态。

对于 VBG 的衍射效率,根据 Kogelnik 的理论,对于反射式布拉格光栅的平面波衍射效率公式为:

$$\eta = \left(1 + \frac{1 - \xi^2 / \Phi^2}{\sinh^2 \sqrt{\Phi^2 + \xi^2}}\right)^{-1} \quad (1)$$

其中, Φ 为满足布拉格条件的相位入侵角,这个值

表示光栅的衍射能力,由光栅厚度,折射率调制度,中心波长和倾斜因子决定,对于反射式布拉格光栅相位入侵角表示为:

$$\Phi = \frac{i\pi t \delta n}{\lambda_0 F_\varphi} \quad (2)$$

其中, t 为光栅厚度; δn 为光栅的折射率振幅调制度; λ_0 为布拉格中心波长; F_φ 为倾斜因子。经过一系列推导后,我们得到无倾斜 VBG 的频谱选择性与衍射效率的关系:

$$\eta(\Delta\lambda) = \left(1 + \frac{1 - \left(\frac{\lambda_0 f^2 \Delta\lambda}{2 n_a \delta n} \right)^2}{\sinh^2 \sqrt{\left(\frac{2\pi n_a t \delta n}{\lambda_0^2 f} \right)^2 - \left(\frac{\pi f t \Delta\lambda}{\lambda_0} \right)^2}} \right)^{-1} \quad (3)$$

根据上述推导对 VBG 的特性进行讨论,布拉格光栅的表面平均折射率 $n_a = 1.42$, 设定中心波长为 1064.15 nm, 而频谱偏离中心频率的波长的衍射效率由 VBG 的长度 t , 折射率调制度 δn 和调制周期 f 决定。

在精确满足布拉格条件 $\Delta\lambda = 0$ 时:

$$\eta_0 = \tanh^2 \frac{\pi t \delta n}{\lambda_0 |\cos \theta_m^*|} \quad (4)$$

对于给定的衍射效率 98%, 我们能够得到 VBG 的厚度与折射率调制度的乘积为定值, 对于给定的厚度有固定的折射率调制度, 反之亦然:

$$\delta n \cdot t_0 = \frac{\lambda_0 |\cos \theta_m^*| \operatorname{atanh}}{\pi} \quad (5)$$

对于 VBG 光栅刻线方向通常平行光栅入射面, 令布拉格角为 0° , 则 $\delta n \cdot t_0 = 8.9564 \times 10^{-7}$, 假定晶体长度为 10 mm, 计算得出光栅的折射率调制率 δn 为 8.9564×10^{-5} , 约 90 ppm (百万分之一), 这个调制度对于 VBG 来说相对较低的调制度。重新考虑式(2)~式(3), 代入上述参数, 可以得到不同光栅频率下 VBG 的频谱选择性 $\Delta\lambda$ 与衍射效率 η 的关系。

实验中体光栅采用了上述参数 $f = 2000$ l/mm, 材料为光热折射 (photo-thermo-refractive, PTR) 玻璃, 是一种特殊的多组分硅玻璃, 在经过紫外光辐射后通过热处理, 便形成了体光栅这种永久折射率改变的特殊元件, 可承受高达 5 J/cm^2 的激光功率密度, 可对激光器波长锁定 (中心波长及宽度, 精度到 50 pm 以内)。

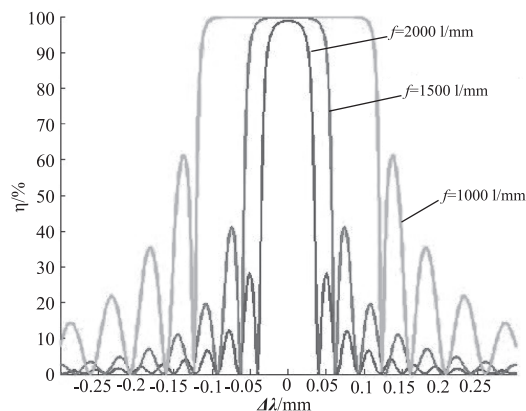


图3 光栅调制频率分别为 $f = 1000$ l/mm、 $f = 1500$ l/mm、 $f = 2000$ l/mm 时, 衍射效率随频谱选择性 $\Delta\lambda$ 的变化

Fig. 3 Schematic diagram of diffraction efficiency changing with frequency spectrum

2.3 升压式 RTP 电光 Q 开关

电光晶体的选择要考虑实际应用过程中编码信号处理精度, 需要考虑调 Q 器件的切换速度和精度, 因此选用速度较快的电光开关, 在高峰值功率脉冲激光器的应用中, 选择损伤阈值高的调 Q 晶体, 通过对不同晶体的特性分析, 横向电场的 RTP 是本项目最适合的电光调 Q 晶体。RTP 要考虑的因素是双块晶体耦合特性差造成的消光比低而可能引起的一些问题。综上考虑, 选择采用 RTP 晶体作为谐振腔调 Q 的电光晶体材料。

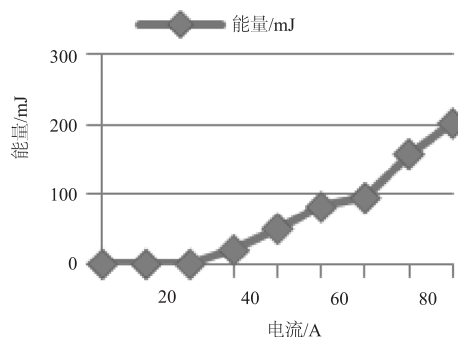


图4 激光能量测试图

Fig. 4 Test chart of laser power

3 实验结果

3.1 单脉冲能量

单脉冲能量的关键影响因素是泵浦光功率、激光工作物质的上能级寿命、谐振腔的腔形选择、808 nm 泵浦光和产生的 1064 nm 激光的模式匹配等因素。泵浦采用 LD 泵浦, 分布方式为对称两组, 每组分 3 套泵浦单元, 工作物质由两根 40 mm 长的 Nd:YAG 串接, 每根棒由 3 套泵浦单元沿棒的轴

向长度方向排布,每套泵浦单元均匀环绕棒轴心,以准连续方式工作。单脉冲激光输出能量大于 200 mJ,与理论设计值一致。

3.2 激光谱线宽度

本文采用的激光工作物质为 Nd:YAG,典型的四能级结构,Nd:YAG 激光器在室温时以最强的 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 跃迁,产生的激光波长为 1064 nm。在室温下,Nd:YAG 产生的 1064 nm 激光谱线因热激发晶格振荡而均匀加宽。

为了获得激光线宽小于等于 0.1 nm 的激光输出,本项目采用反射式体布拉格光栅(RBG)作为全反镜,布拉格体光栅采用了前面设计的参数。利用 YOKOGAWA 公司的光谱仪测得激光器输出波长为 1064 nm,线宽(半高宽)小于 0.1 nm 的激光输出,如图 5 所示。



图 5 激光线宽光谱图

Fig. 5 Pictures of laser line width

3.3 激光发散角

激光器 20 Hz 正常工作时,测得输出激光的原始发散角 X、Y 方向分别为 1.6 mrad 与 1.1 mrad,如图 6 所示。

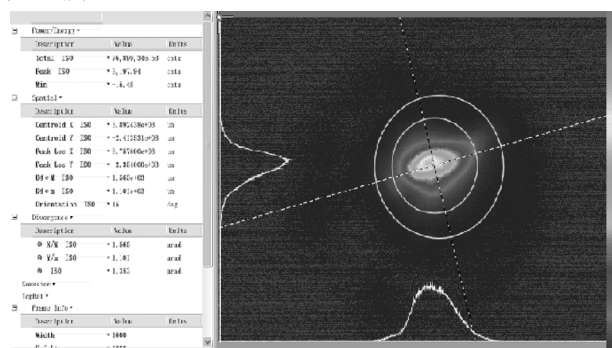


图 6 激光光束质量测试图

Fig. 6 Pictures of laser beam quality

3.4 激光脉冲宽度

激光器 20 Hz 正常工作时,测得输出激光的脉冲宽度为 8.5 ns,如图 7 所示。

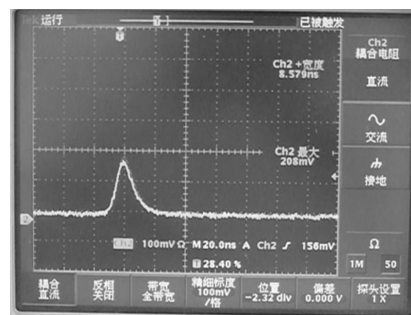


图 7 激光脉冲宽度测试图

Fig. 7 Pictures of laser pulse width

4 结论

本文研制了一种布拉格体光栅(VBG)作为全反镜的高峰值功率、窄线宽、高光束质量的主动调 Q 固体激光器,采用 LD 侧面空间补偿泵浦方案,升压式 RTP 晶体电光调 Q,利用布拉格体光栅(VBG)压窄线宽等技术。在工作频率 20 Hz 时,获得了脉冲宽度 ≤ 10 ns,单脉冲能量 ≥ 200 mJ,光束发散角 ≤ 2 mrad,在室温 25 °C 时,中心波长 1064 nm,中心波长漂移量 ≤ 0.05 nm,线宽(半高宽)与 ≤ 0.1 nm 的激光输出。可以直接应用于各种恶劣环境条件下,具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Chung T Y, Rapaport A L, Smirnov V, et al. Solid-state laser spectral narrowing using a volumetric photothermal refractive Bragg grating cavity mirror[J]. Optics Letters, 2006, 31(2): 229 - 231.
- [2] High efficiency volume diffractive elements in photo-thermo-refractive glass: US, 6673497 B2 [P]. 2004.
- [3] Zayhowski J J, Mooradian A. Single-frequency microchip Nd: YAG lasers [J]. Opt. Lett., 1989, 14(12): 618 - 620.
- [4] BO Baoxue, GAO Xin, QIAO Zhongliang, et al. Characteristics of high power volume bragg grating external cavity semiconductor lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 35(4): 501 - 504. (in Chinese)
- [5] 薄报学, 高欣, 乔忠良, 等. 大功率体光栅外腔半导体激光器的输出特性 [J]. 中国激光, 2008, 35(4): 501 - 504.
- [5] Igor V Ciapurin, Leonid B Glebov, Vadim I Smirnov. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass [J]. SPIE, 2005, 5742: 183 - 194.