

二极管泵浦的高重频脉冲固体激光器研究

周寿桓, 姜东升

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

[摘要] 文章报道二极管泵浦的1 000 Hz高重频、脉冲固体激光器的实验研究结果: 双向端面泵浦, 每个脉冲输出43 mJ, 近TEM₀₀模, 光-光转换效率 $\eta=43\%$ 。采用端面泵浦结构, 在输出激光的效率、模式上都具有明显的优势, 对工作物质冷却的结构也比较简单, 且不会因为冷却而牺牲泵浦效率。

[关键词] 脉冲固体激光器; 端面泵浦; 高重复频率

1 概述

由于受传统灯泵浦两个主要缺点(效率低、热效应严重)的困扰, 第一台激光器(红宝石激光器)发明不久, 人们就开始寻找泵浦固体激光器更有效的新方法, 其中用二极管泵浦受到最多的关注^[1~5]。但直到最近十几年, 由于高功率激光二极管及其阵列在研究和生产方面取得了重大的突破^[6], 二极管泵浦的固体激光器(DPSL)的相关理论、技术、应用研究才日新月异地开展起来, 很快发展成一类新型的全固化器件。用二极管泵浦, 不仅对效率和热效应有重大的改善, 而且还能获得用闪光灯泵浦所不可能获得的一些特殊性能, 如小型、牢固、稳定(光、机、频率、波形)、快速反应等, 特别在军事应用上更具有重要意义。因此, DPSL技术越来越受到人们的重视, 有关的研究十分活跃^[7~15]。但对 $\geq 1\ 000$ Hz、每个脉冲输出能量几十毫焦级的几乎没有报道, 这类激光器在大地测绘、电力线检测、信标等有重要应用。文章报道二极管泵浦Nd:YAG(掺钕钇铝石榴石晶体)激光器的实验研究结果, 采用双向端面泵浦, 工作重复频率1 000 Hz, 每个脉冲输出43 mJ, 近TEM₀₀模, 光-光转换效率 $\eta=43\%$ 。

2 理论分析和设计考虑

设计二极管泵浦的千赫兹高重复频率固体激光器时应考虑以下几个问题: 工作物质; 泵浦方式; 聚焦系统; 热效应及冷却措施; 热稳、大模体谐振腔设计等。下面将对其中几个主要问题进行简要讨论。

1) 设在工作物质内部, 泵浦光光场分布近似高斯分布, 由四能级系统的速率方程^[16,17], 可求得泵浦阈值功率

$$P_{th} = \frac{\pi h \nu_p n \delta (\omega_0^2 + \omega_p^2)}{4 \eta_a \sigma \tau}, \quad (1)$$

基模输出功率

$$P_{out} = [1 - \exp(-\alpha_p l)] (P_{in} - P_{th}) \frac{\nu T J}{\nu_p \delta}, \quad (2)$$

斜效率

$$\eta_s = \frac{\eta_a \nu T J}{\nu_p \delta}, \quad (3)$$

最佳输出耦合度

$$T_{opt} = \frac{1}{2} \delta_0 \alpha^2 + \delta_0 \alpha_0. \quad (4)$$

式(1~4)中, h 为普朗克常数, ν 为激光频率, ν_p 为泵浦光频率, η_a 为工作物质对泵浦光的吸收效率, σ 为受激发射截面, τ 为工作物质的荧光寿

命, n 为工作物质的折射率, $\delta = \delta_0 + T$ 为谐振腔总损耗, δ_0 为激光谐振腔内的固有损耗, T 为腔镜的输出耦合度, w_0 和 w_p 分别为振荡光和泵浦光在工作物质内的平均光斑尺寸, α_p 为工作物质对泵浦光的吸收系数, l 为工作物质的长度, P_{in} 为入射到工作物质表面的泵浦功率, J 为重叠效率因子, 它表征泵浦光与振荡光在空间的重叠程度, α 为振荡光与泵浦光在工作物质内平均截面积之比。

可以看出: 为了降低泵浦阈值, 可采用 $\sigma\tau$ 乘积比较大的工作物质; 减小腔损耗 δ 和压缩泵浦光和振荡光的光斑尺寸; 增加泵光和振荡光在空间的重叠程度。利用以上公式, 通过数值计算可求得在给定输入光功率和泵光光斑半径下, 最佳输出耦合度和最佳振荡光与泵浦光光斑大小比, 并以此作为设计激光器的依据。

2) 一般采用二极管泵浦有两种形式: 端面泵浦和侧面泵浦。与侧面泵浦相比, 端面泵浦具有效率高、模式好, 在适当设计聚光系统的情况下, 可增加工作物质的长度以弥补二极管的温度漂移, 因此可以减小激光系统性能受温度的影响, 工作物质的冷却比较简单, 且几乎不影响泵浦效率。其缺点是泵浦系统较复杂, 高平均功率工作时, 工作物质端面局部热效应严重, 故适于中小功率应用。

通过理论分析和计算机数值模拟^[17], 得知采用端面泵浦, 在平均泵浦功率 100 W 情况下, 焦斑直径约 2 mm, 输出耦合度约为 20 % 时, 可获得满意的效果。

3) 目前适于本实验要求的工作物质主要有 Nd:YAG 和 Nd:YLF 两种。Nd:YLF 比较适合, 它的荧光寿命比 Nd:YAG 大一倍, 因此所需用的泵浦二极管可减少一半。但它的吸收带宽太窄, 温控要求严格^[18]。另外, 它的机械强度和热导率都不如 YAG, 所用的泵浦二极管不能与 Nd:YAG 共用, 需投入另外一笔经费。因此在本实验研究中我们仍采用性能适中、机械强度和热导率都最高的 YAG。

4) 采用二极管泵浦, 使进入工作物质的热大大减少, 但并没有“消除热效应”。由于聚焦的结果, 在工作物质内的局部区域泵浦强度非常高, 造成工作物质横截面内温度分布不均匀。因此, 光学畸变仍然很严重。其结果是输出功率降低, 光束质量变差。在 >50 Hz 重复频率、中等功率的激光器

实验研究中, 已能观察到“热效应”的影响了。

对于端面泵浦结构, 减小焦斑, 可降低阈值, 提高效率, 但总输出能量不一定最大。而且, 热效应也较严重。因此, 要根据具体需要的功率水平统筹考虑。通过理论分析、计算机模拟, 选取适中的焦斑直径和尽可能大的焦深, 并为腔型设计、热效应补偿等提供了依据。

5) 设计谐振腔参数时, 主要考虑了泵光在工作物质内造成的热透镜效应和最佳输出耦合度。热透镜效应可简化为焦距为 f_T 的一个透镜的影响。最佳输出耦合度则根据计算机模拟并由实验进行修正。

3 实验及结果

通过上面的简要分析, 实验中选用 Nd:YAG 作为激光工作物质, 采用端面泵浦方式, 泵浦焦斑直径 2 mm, 平-凹稳定腔及输出耦合度 20 %。

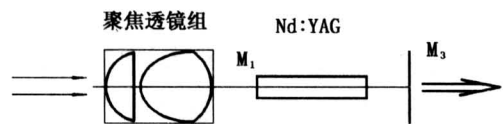


图1 单管端面泵浦激光器实验光路图

Fig.1 The experimental setup schematic of single diode stack end pumped laser

图1是单管端面泵浦的实验光路图。二极管由5条发光面为 $1\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ mm}$ 的阵列堆积而成。每条发光面都有精确配置的微透镜将光沿着快轴方向会聚成近平行光, 相邻两条之间留有适当距离并有微通道通水冷却, 以保证在 >20 % 的高占空比工作时, 能有效除去二极管本身产生的热。经微透镜校正的泵浦光再由柱透镜、非球面透镜组聚集, 焦斑直径约 2 mm。二极管与聚焦透镜组一起构成紧凑、牢固、一体化的泵浦系统对 Nd:YAG 进行端面泵浦。掺杂约 1at%、直径 3 mm, 长 10 mm 的 Nd:YAG 棒的一个端面 (M_1) 镀上对 808 nm 光增透的、对 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 光全反的介质膜, 另一端镀上对 808 nm 光、 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 光增透的介质膜。谐振腔输出镜 (M_3) 对 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 光的透过率 $T=20\%$, 曲率半径为 2 m。Nd:YAG 棒包以铝箔后固定在紧密配合的铜套内, 铜套通水冷却。若以高速水流冲击 Nd:YAG 棒侧表面冷却效果会更好。

仔细调节 Nd:YAG 棒相对泵浦系统的取向和

纵向位置、 M_3 镜的取向，以获得泵浦光与腔模的最佳重叠和最高的泵浦效率。同时，在 1 000 Hz 重复频率下，观察到棒内均匀泵浦的荧光分布。图 2、图 3 分别是单管端面泵浦时激光输出与输入能量的关系曲线和激光输出能量与输出耦合度的关系曲线。

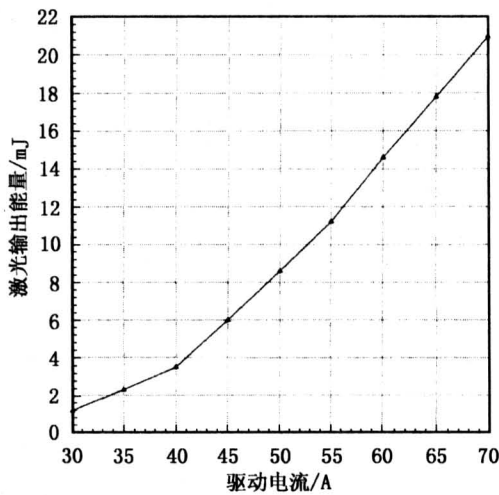


图 2 单管端面泵浦激光输出与输入能量的关系曲线

Fig.2 The output laser energy vs. input energy by single diode stack end pumped

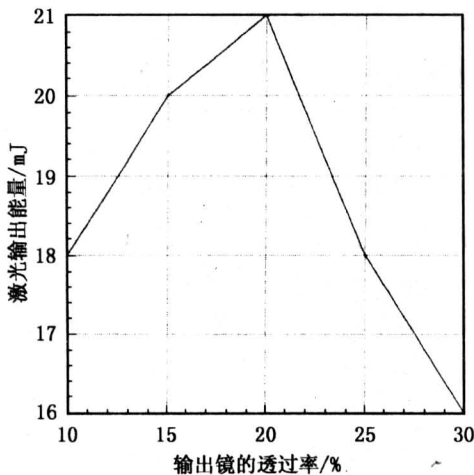


图 3 单管端面泵浦输出能量与输出耦合度的关系曲线

Fig.3 The output energy vs. the output coupling degree by single diode stack end pumped

在单管泵浦的基础上，我们增加了一个与上述

性能、结构、聚光透镜组都完全一样的泵浦系统，从 Nd:YAG 棒的另一个端面进行泵浦，如图 4 所示。在结构布置上考虑了插入偏振片和 Q 开关晶体 KD^*P 的位置。折叠镜 M_2 面向 Nd:YAG 棒的一面镀上对 808 nm 光增透的、对 1.064 μm 光全反射的介质膜，另一面镀上对 808 nm 光增透的介质膜，并且尽量缩短它与 Nd:YAG 棒端面间的距离，以便调节泵浦系统在晶体内得到最佳的泵浦焦点位置。工作时，首先调节两个泵浦系统、Nd:YAG 棒、谐振腔，使它们共轴，以及 Nd:YAG 棒、两个泵浦系统间的纵向距离，使激光输出最大。在 1 000 Hz 重复频率下、泵浦脉宽 200 μs 、每个脉冲泵浦能量 100 mJ 时，激光输出 43 mJ、近 TEM_{00} 模，光-光转换效率 43 %。

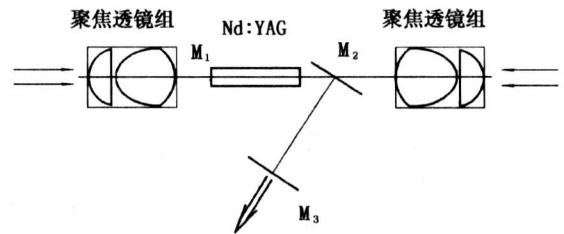


图 4 两管两端端面泵浦激光器实验光路图

Fig.4 The experimental setup schematic of double diode stack end pumped laser

4 结论

工作重复频率 1 000 Hz、每个脉冲输出能量几十毫焦级的中小功率激光器，采用端面泵浦，在输出激光的效率、模式上都具有明显的优势，对工作物质冷却的结构也比较简单，且不会因为冷却而牺牲泵浦效率。只要设计合理，中小功率应用时不会引起严重的热效应。

参考文献

- [1] Newman R. Excitation of the Nd^{3+} fluorescence in $CaWO_4$ by recombination radiation in GaAs [J]. J. Appl. Phys., 1963, 34 (3): 437~439
- [2] Keyes R J, Quist T M. Injection luminescent pumping of $CaF_2 : U^{3+}$ with CaAs diode lasers [J]. Appl. Phys. Lett., 1964, 4 (3): 50~52
- [3] Ross M. YAG laser operation by semiconductor laser pumping [J]. Proc. IEEE, 1968, 56 (2): 196~197

- [4] Zhou B, Kane T J, Dixon G J, et al. Efficient, frequency-stable laser-diode-pumped Nd:PYA laser [J]. *Opt. Lett.*, 1985, 19 (2): 62~64
- [5] 寿桓. 用发光二极管泵浦的 YAG:Nd 激光器 [J]. *激光与红外*, 1975, (3): 149~157
- [6] Fan T Y, Byer R L. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE JQE*, 1988, 24 (6): 895~912
Streifer W, Scifres D R, Harnagel G L, et al. Advances in diode laser pumps [J]. *IEEE JQE*, 1998, 24 (6): 883~894
- [7] Kozlovsky W J, Fan T Y, Byer R L. Diode-pumped continuous-wave Nd:Glass laser [J]. *Opt. Lett.*, 1986, 11 (12): 788~790
- [8] Zhou S H, Lee K K, Chen Y C, et al. Monolithic self-Q-switched Cr, Nd:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, 18 (7): 511~512
- [9] Moon H J, Yi J, Han J, et al. Efficient diffusive reflector-type diode side-pumped Nd:YAG rod laser with an optical slope efficiency of 55 % [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38 (9): 1772~1776
- [10] Hirano Y, Koyata Y, Yamamoto S, et al. 203 - W TEM₀₀ operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24 (10): 679~681
- [11] Selker M D, Afzal R S, Dallas J L, et al. Efficient, diode-laser-pumped, diode-laser-seeded, high-peak power Nd:YLF regenerative amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1994, 19 (8): 551~553
- [12] Armandillo E, Norrie G, Cosentino A, et al. Diode-pumped high-efficiency high-brightness Q-switched Nd:YAG slab laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22 (15): 1168~1170
- [13] Tei K, Kato M, Niwa Y, et al. LD-pumped 0.62 J, 105 W Nd:YAG green laser [A]. *Proc. SPIE [C]*, 1998, 3265: 212~218
- [14] Bruesselbach H W, Sumida D S, Reeder R A, et al. Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG Lasers [J]. *IEEE JQE Selected Topics*, 1997, 3 (1): 105~116
- [15] Sumida D S, Bruesselbach H, Byren R W, et al. High-power Yb:YAG rod oscillators and amplifiers [A]. *Proc. SPIE [C]*, 1998, 3265: 100~105
- [16] Alfrey A J. Modeling of longitudinally pumped CW Ti:Sapphire laser oscillators [J]. *IEEE JQE*, 1989, 25 (4): 760~766
- [17] 姜东升. 二极管泵浦脉冲固体激光技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 1999
- [18] Mermilliod N, Romero R, Chartier I, et al. Performance of various diode-pumped Nd: Laser materials: influence of inhomogeneous broadening [J]. *IEEE JQE*, 1992, 28 (4): 1179~1186

Study on Diode-pumped Solid-state Laser with High Pulsed Repetition Rate

Zhou Shouhuan, Jiang Dongsheng

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

[Abstract] The experimental results were reported on diode-pumped solid state laser with 1 kHz high pulsed repetition rate: 43 mJ of single output pulse energy, lower order mode, 43% of light-light conversion efficiency. For diode end pumping, it is quite easy to obtain high efficiency and high output beam quality, the cooling configuration of laser media is simple, too. With fine design, the thermal effect induced by moderate power could be within control.

Based on rate equation analysis, the influences of various characters on output performance were discussed and the optimum experimental parameters were studied, such as the focal size of pump light. In general, the smaller focal size, the lower pumping power threshold. But the output laser power was not maximum. The optimum focal size should be determined according to the actual output laser power.

[Key words] pulsed solid-state laser; end-pumping; high repetition rate