

文章编号: 0258-7025(2006)03-0289-04

双侧面 90°抽运微通道致冷 Yb:YAG 板条激光器

李劲东, 李小莉, 陆雨田, 朱小磊

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 报道了采用带有微柱镜的激光二极管阵列(LDA)双侧面 90°排布抽运的 Yb:YAG 板条激光器, 实验中使用的激光晶体尺寸为 6 mm×10 mm×1 mm, 掺杂原子数分数为 3%。抽运光通过自行设计的聚光系统聚焦成 10 mm×1 mm 的光斑进行抽运, 聚光系统的效率为 75%, 晶体表面功率密度达到 1.9 kW/cm², 晶体内抽运光交叠区的体功率密度达到 38 kW/cm³, 远高于阈值的 1.7 kW/cm³。当激光器采用平-凹腔结构, 耦合输出为 6% 时激光单脉冲输出能量最高为 25.5 mJ, 斜率效率为 13%。插入声光调 Q 晶体后获得 4.7 mJ 的调 Q 脉冲输出, 脉宽为 24.8 ns。

关键词 激光技术; 固体激光器; 激光二极管阵列; 侧面抽运; Yb:YAG 板条

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Laser-Diode Side-Pumped Yb:YAG Slab Laser with Microchannels Heat Sink

LI Jin-dong, LI Xiao-li, LU Yu-tian, ZHU Xiao-lei

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A laser diode array (LDA) with the micro-lens two-side-pumped Yb:YAG slab laser was reported, the Yb:YAG slab was in size of 6 mm×10 mm×1 mm, and the doping concentration was 3 at.-%. A novel structure was designed to focus the pump beam to as small as 10 mm×1 mm in size. The transmission efficiency of the structure is about 75% and the pump intensity could be reached as high as 1.9 kW/cm² on the surface and 38 kW/cm³ in the bulk that is more higher than the threshold of 1.7 kW/cm³. The maximum output pulse energy of 25.5 mJ with slope efficiency of 13% was obtained from a plano-concave cavity with an output coupling of 6%. Once an acousto-optic modulator (AOM) was inserted into the cavity, Q-switched pulse with energy of 4.7 mJ and pulse width of 24.8 ns were achieved.

Key words laser technique; solid-state laser; laser diode array; side-pumped; Yb:YAG slab

1 引 言

Yb:YAG 作为激光晶体已经出现几十年, 其能级结构为三能级, 吸收带在 940 nm 附近。Yb:YAG 的能级结构图非常简单, 仅有一个基态 $^2F_{7/2}$ 和一个激发态 $^2F_{5/2}$, 两者的能量间隔为 10000 cm⁻¹[1]。与 Nd:YAG 晶体相比, Yb:YAG 晶体的斯托克斯频移更小, 量子亏损更低, 这就使激光晶体内的产热系数更小[2], 可以减轻由抽运耗散热量带来的一系列

问题, 如热透镜效应、热致双折射等。并且 Yb:YAG 晶体的上能级寿命约是 Nd:YAG 的 4 倍[3], 这些特性使其非常适合用于制作脉冲激光器。但是由于 Yb:YAG 晶体为三能级结构, 其要求的阈值抽运能量密度很高, 当掺杂原子数分数为 1% 时就高达 1.7 kW/cm³[1], 这就使得初期用闪光灯抽运时需要输入很高的功率。近年来, 随着半导体激光制造技术的迅猛发展, 高功率 940 nm 的激光二极管阵列(LDA)制造技术日趋成熟, Yb:YAG 晶体具有的优

收稿日期: 2005-07-06; 收到修改稿日期: 2005-11-03

基金项目: 中国科学院创新前沿课题(X030506)资助项目。

作者简介: 李劲东(1978—), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事大功率高重复频率固体激光技术的研究。E-mail: trampingnow@hotmail.com

源激光物理性能才渐渐发挥出来,使得 Yb:YAG 晶体越来越引起人们的关注。目前, Yb:YAG 晶体已被作为获得高效率、大能量全固态激光器的新途径^[4~6],并很有希望达到 100 kW 量级的激光功率输出^[7]。

考虑到 Yb:YAG 属准三能级结构,抽运阈值较高,为了易于实现激光振荡输出,目前全固态 Yb:YAG 激光器的抽运方式通常以端面抽运方式为主^[8~10],采用端面抽运结构 Yb:YAG 激光器,已成功地实现激光单脉冲输出能量 500 mJ^[11],连续功率输出达千瓦级^[12]。由于 Yb:YAG 激光晶体端面尺寸有限,要进一步提高抽运功率显得非常困难,为了进一步提高激光器的输出功率,侧面抽运结构将是必然选择。但 Yb:YAG 晶体的抽运阈值很高,侧面抽运结构首先要解决的是如何提高抽运功率密度的问题。国外采用侧面抽运结构方式已获得了 35 W 的激光输出^[13],国内在这方面也开展了相关的工作^[14]。本文通过设计高效率的抽运光聚光系统,在实验中获得效率优于 75% 的高功率密度的抽运光束,采用新颖的两路正交排布的抽运方式,成功地在台侧面激光二极管阵列抽运的 Yb:YAG 激光器上获得 25.5 mJ 脉冲输出,其斜率效率达到 13%。

2 仿真计算及结构设计

在半导体激光侧面抽运 Yb:YAG 激光器结构中,聚光光学系统是实现激光器高效率运转的关键组件。采用带微柱透镜准直的由 7 条激光二极管组成的阵列作为抽运光源,占空比为 10%,在电流 100 A 时激光二极管阵列的峰值功率为 700 W。为了能够在 Yb:YAG 晶体内部形成高于阈值的激活区,需要将抽运光源的光束会聚成小于 1 mm × 10 mm 的细光斑。根据激光二极管阵列输出光束的特性,借助 Zemax 光学设计程序,首先对聚光系统进行仿真,图 1 为模拟的整形后的光斑形状,图 2 为归一化的抽运光强度分布图,图中可以看出激光二极管阵列输出能量经过聚焦系统后主要集中在中间 1 mm 的范围内。实验中首先对设计的聚光系统进行性能测试,在激光二极管阵列驱动重复频率为 14 Hz,驱动电脉冲宽度为 200 μm 时,测量得到聚光系统的光传输效率高达 75%,在抽运深度 1 mm 的情况下晶体内部的抽运光功率密度已达到 39.3 kW/cm³,超过了 Yb:YAG 晶体的抽运阈值。用 CCD 摄像头监

视抽运光斑形状发现,抽运光并没有形成宽度一致的线光斑,这是因为激光二极管阵列里面的发光点并没有被安装在一个直线上,加上工作时热产生的膨胀作用,使激光二极管产生 smile 效应,导致经过微柱镜整形后的激光二极管阵列光束平行度并不是很理想,抽运光的实际光斑比仿真模拟值要宽一些。



图 1 模拟的抽运光斑形状

Fig. 1 Calculated the spatial profile of the pump light

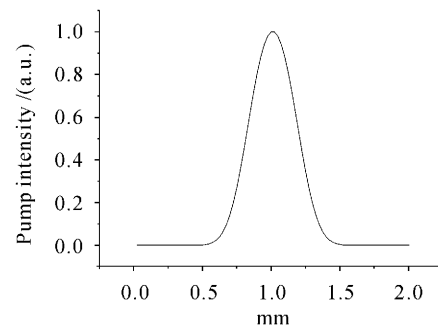


图 2 抽运光的光强分布

Fig. 2 Distribution of the pump light intensity

考虑到 Yb:YAG 晶体为三能级系统,其下能级在常温下离子数占总离子数量的 5.5%^[1],其速率方程表示为^[15]

$$\frac{d\phi}{dt} = \sigma_e \frac{l_s}{l_c} (\Delta n - \Delta n_{th}) \phi, \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\gamma c \sigma_e \Delta n \phi, \quad (2)$$

式中 ϕ 为腔内光子数密度, c 为真空中的光速, σ_e 为受激发射截面, l_s 为激光介质长度, l_c 为激光器腔长, Δn 为反转离子数密度, Δn_{th} 为阈值反转离子数密度。由(1),(2)式可以推得激光器的最佳输出耦合率 R_{opt} 和激光脉冲输出能量 E_{out}

$$R_{\text{opt}} = \frac{1}{T^2} \times \exp \left\{ 2 \frac{\Delta n \times \sigma_e \times l_s + \ln(T)}{\ln \left[-\frac{\ln(T)}{\Delta n \times \sigma_e \times l_s} \right]} \right\}, \quad (3)$$

$$E_{\text{opt}} = \frac{1}{2} A \cdot \frac{h\nu_e}{\sigma_{\text{eff}}} \cdot \ln(R_{\text{opt}}) \cdot \ln \left[-\frac{\ln(T)}{\Delta n \times \sigma_e \times l_s} \right]. \quad (4)$$

3 实验结果及讨论

图 3 为 Yb:YAG 激光器的结构简图。激光器设计成平-凹稳腔结构,几何腔长约为 80 mm,凹面镜为输出镜,曲率半径为 200 mm,平面镜镀有 1050 nm 的全反膜。Yb:YAG 晶体尺寸为 6 mm × 10 mm × 1 mm,掺杂原子数分数为 3%,侧面镀 940 nm 减反膜,端面镀 1030 nm 增透膜。激光二极管阵列抽运光经聚光系统后会聚照射在晶体 10 mm × 1 mm 的表面和 6 mm × 10 mm 表面的边缘部位,由于 Yb:YAG 阈值较高,需要较高的抽运功率密度,单靠一个方向增加抽运功率比较困难,主要是随着抽运源的增多,激光二极管阵列的尺寸增加,通过整形系统要获得和晶体侧面大小相当的光斑比较困难,为了获得更高的抽运功率,本实验采用了双侧面 90°抽运。实验中两个相互垂直的表面的功率密度为 1.9 kW/cm²,晶体内部的功率密度更是达到了 38 kW/cm³,从而保证了在两个抽运光相交的地方达到了阈值。同时为了使晶体具有更好的散热条件,工作中让晶体一个 10 mm × 6 mm 的表面和另外一个 10 mm × 6 mm 表面剩下的部分通过金属铜安装在微通道热沉上,冷却水温度保持在 15 °C。当激光二极管阵列驱动电流为 33 A,脉冲宽度为 1 ms 时,Yb:YAG 激光器达到振荡阈值,继续升高驱动电流到 80 A 时,Yb:YAG 激光器单脉冲输出能量最高达 25.5 mJ,斜率效率为 13%。图 4 为 Yb:YAG 激光器输出能量随抽运输入能量的变化趋势。尽管 Yb:YAG 晶体性能受温度影响严重,但由于实验中的脉冲重复频率比较低,微通道热沉冷却效果比较好,激光能量输出还没有出现因晶体温度升高而造成

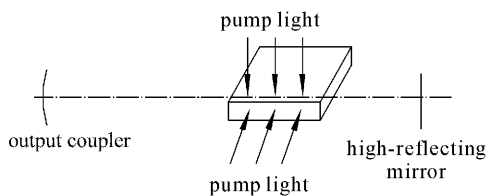


图 3 激光器结构示意图
Fig. 3 Configuration of laser system

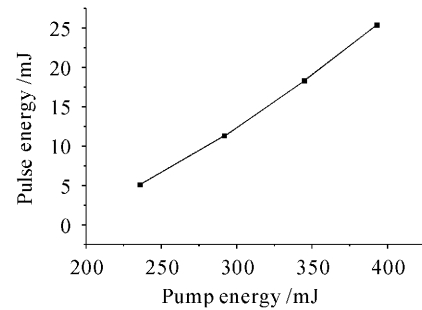


图 4 激光输出脉冲能量随抽运能量的变化曲线
(耦合输出率为 9.0%,晶体冷却水温 15 °C)

Fig. 4 Output energy versus pumped energy
(output coupler reflectivity is 9.0% and cool water temperature is 15 °C)

成的饱和现象。

实验中观测了不同输出耦合镜对激光输出的影响。当腔长为 90 mm,用 $R = 200$ mm 的全反镜和平面耦合输出镜作谐振腔的时候,在激光二极管阵列驱动电流为 80 A 的条件下,分别测量了输出耦合率为 21.5%,28.3%,37.8% 时的平-凹腔激光输出,如图 5 所示。实验结果与用(4)式给出的理论值(37.8%)差别最大,为 15%。

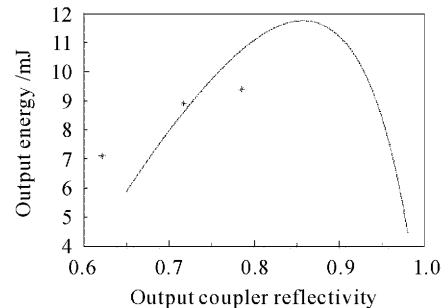


图 5 耦合输出率与输出脉冲能量的关系
Fig. 5 Output energy versus reflectivity of output coupler

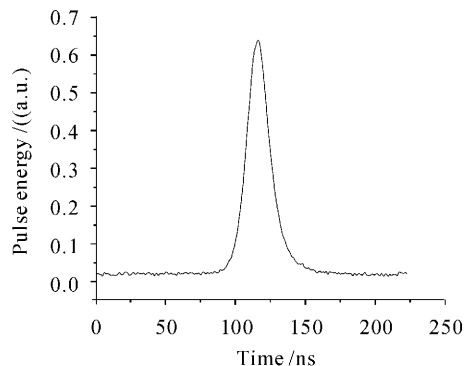


图 6 调 Q 脉冲波形图
Fig. 6 Q-switch pulse profile

实验中,在谐振腔内插入了声光调 Q 元件,成功地获得了主动调 Q 输出。调 Q 脉冲的单脉冲能量为 4.7 mJ,脉冲宽度为 24.8 ns,参见图 6 所示的脉冲波形。

4 结 论

报道了采用自主设计的高效率聚焦系统的激光二极管阵列双侧面抽运的 Yb:YAG 全固态激光器,在重复频率 1 Hz 的情况下,单脉冲输出能量为 25.5 mJ,斜率效率为 13%。当在腔内插入声光调制器(AOM)后,实验上成功地观察到调 Q 输出,调 Q 脉冲输出能量为 4.7 mJ,峰值功率达到 0.23 MW。

参 考 文 献

- Walter Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 75
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 75~
- T. Y. Fan. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(6):1457~1459
- William F. Krupke. Ytterbium solid-state lasers—the first decade [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(6):1287~1296
- C. Stewen, M. Larionow, A. Giesen *et al.*. Yb:YAG thin disk laser with 1kW output power [J]. *Advanced Solid State Lasers*, 2000, **34**:35~41
- Eric C. Honea, Raymond J. Beach, Scott C. Mitchell *et al.*. High-power dual-rod Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11):805~807
- Christian Stewen, Karsten Contag, Mikhail Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin disc laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4):650~657
- Todd S. Rutherford, William M. Tulloch, Eric K. Gustafson *et al.*. Edge-pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(2):205~219
- Li Lei, Yang Suhui, Sun Wenfeng *et al.*. LD-pumped Yb:YAG chip laser with high beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1285~1288
李 磊,杨苏辉,孙文峰等. 激光二极管抽运的高光束质量的 Yb:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(11):1285~1288
- Wu Haisheng, Yan Ping, Gong Mali *et al.*. QCW-LD-pumped Yb:YAG microchip lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):97~100
吴海生,闫 平,巩马理等. 准连续激光二极管抽运的 Yb:YAG 微晶片激光器[J]. 中国激光, 2003, **30**(2):97~100
- Haisheng Wu, Ping Yan, Mali Gong *et al.*. A passively Q-switched diode pumped Yb:YAG microchip laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(12):697~698
- A. Mandl, D. E. Klimek. Compact diode-pumped Yb:YAG slab laser [C]. *SPIE*, 2001, **4267**:1~8
- Eric C. Honea, Raymond J. Beach, Scott C. Mitchell *et al.*. Dual-rod Yb:YAG laser for high-power and high-brightness applications [J]. *Advanced Solid State Lasers*, 2000, **34**:42~47
- Masao Sato, Nobuaki Iehisa, Norio Karube. LD pumped slab Yb:YAG laser [C]. *SPIE*, 2000, **3889**:208~215
- Haisheng Wu, Ping Yan, Mali Gong *et al.*. Quasi-cw diode arrays pumped Yb:YAG slab laser [C]. *SPIE*, 20002, **4914**:14~20
- Raymond J. Beach. Optimization of quasi—three level end-pumped Q-switched lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(9):1606~1613